

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

Predrag D. Mrđa

**Povećanje efikasnosti ispitivanja motora
SUS primenom dinamičkih metoda**

doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Predrag D. Mrdja

**Internal combustion engine testing
efficiency improvement using dynamic
methods**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020.

Komisija za pregled i odbranu:

Mentor:

dr Nenad Miljić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

Članovi komisije:

dr Slobodan Popović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

dr Dragan Knežević, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

dr Jovan Dorić, vanredni profesor
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

dr Radivoje Pešić, redovni profesor
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Datum odbrane: 29.9.2020. godine.

Povećanje efikasnosti ispitivanja motora SUS primenom dinamičkih metoda

Rezime

Sa povećanjem obima i broja zahteva koje savremeni motori SUS moraju da zadovolje, drastično se povećavaju potrebe za razvojnim resursima. Povećanjem dimenzionalnosti upravljačkog sistema motora SUS, ukupan broj upravljačkih parametara raste, što za posledicu ima značajno usložnjavanje procesa optimizacije s obzirom na približno eksponencijalno povećanje broja mogućih kombinacija diskretnih vrednosti upravljačkih parametara.

Plan stacionarnog ispitivanja motora SUS se formira na osnovu prethodno stečenog znanja o ispitivanom objektu. U ovom radu analizirana je jedna od metoda dinamičkog ispitivanja motora na osnovu koje se nivo predznanja proširuje radi formiranja kvalitetnijeg i efikasnijeg plana ispitivanja. Predmetna metoda se zasniva na sporoj promeni jednog globalnog upravljačkog parametra, dok se ostali zadržavaju na konstantnom nivou. U literaturi se ovakav vid dinamičkog ispitivanja naziva *Slow Dynamic Slope* (spor dinamički nagib - SDN). S obzirom na to da je motor SUS izrazito nelinearan i dinamički sistem, u radu su analizirani rezultati ispitivanja dva različita pristupa sprovođenja dinamičkog eksperimenta. Prva kategorija SDN sekvenci započinje stacionarnim radnim režimom, dok drugu kategoriju čine sekvence sa isključivo dinamičkim karakterom tj. sa potpunim odsustvom ustaljenog upravljanja.

Za potrebe ovog istraživanja, variran je parametar opterećenja motora po nagibnoj funkciji različitih gradijenata. Na osnovu dinamičkih odziva, tj. srednje linije karakterističnih ovojnica merenih signala (posmatranih u domenu varirane pobude), formirane su aproksimacije koje u većoj ili manjoj meri opisuju stacionarni odziv posmatranog sistema na delu globalnog radnog polja motora SUS. Time je, relativno kratkotrajnim dinamičkim ispitivanjem, prikupljena velika količina informacija o približnoj stacionarnoj karakteristici ispitivanog motora, a te informacije mogu da se iskoriste za dalju nadogradnju plana stacionarnog ispitivanja.

Pokazano je da postoje određene oblasti globalnog radnog polja motora SUS u okviru kojih bi bilo poželjno povećati gustinu stacionarnih radnih režima kako bi

se formirali precizniji aproksimativni modeli. Takođe, zahvaljujući ovako stečenom predznanju, moguće je formirati približno idealan redosled ispitivanja posmatrano sa aspekta minimizacije neophodnog vremena stabilizacije za niz stacionarnih radnih režima predviđenih planom ispitivanja motora SUS u laboratorijskim uslovima.

Ključne reči: Motori SUS, dinamičko ispitivanje motora, plan ispitivanja, stacionarna aproksimacija, redosled izvršavanja

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Motori sa unutrašnjim sagorevanjem

UDK: 621.43(043.3)



Internal combustion engine testing efficiency improvement using dynamic methods

Abstract

With ever-increasing demands that modern internal combustion (IC) engines must meet, needed development resources drastically increases as well. Higher dimensionality of the IC engine control system, results in a significant complexity of the optimization process, due to the approximately exponential increase in the total number of possible control parameters value combinations.

The plan for stationary testing of the IC engine is formed based on the previously acquired knowledge about the tested object. In this Dissertation, one of the dynamic engine testing pre-knowledge acquisition methods is analyzed, with the goal of obtaining a better and more efficient stationary test plan. This method is based on a slow change of one global control parameter, while the others remain at a constant level. In the literature, this type of dynamic testing is called Slow Dynamic Slope (SDS). Given that the IC engine is a highly nonlinear and dynamic system, the Dissertation analyzes the results of two different approaches to conducting a dynamic experiment. The first category of SDS sequences begins with a stationary operating mode, while the second category consists of sequences with an exclusively dynamic character, i.e. with a complete absence of (quasi-) steady state engine management.

For the scope of this research, the engine load parameter was varied according to the slope function of different gradients. Based on dynamic responses, i.e. middle lines of characteristic envelopes of measured signals (observed in the domain of varied excitation), stationary base approximations are formed, which, to some extent, describe the stationary response of the observed system on the global IC engine operation field. Thus, a relatively short-term dynamic test, allows for the collection of a large amount of information on the approximate stationary characteristics of the tested engine, and this information can be used to further upgrade the stationary test plan.

It has been shown that there are certain areas of the global IC engine operation field within which it would be desirable to increase number of stationary operating points in order to form more precise approximation models. Also, thanks to the

acquired pre-knowledge, it is possible to form an almost ideal test sequence from the aspect of minimizing the necessary stabilization time for a number of stationary operating regimes defined by the test plan, and thus perform laboratory IC engine testing in more effective way.

Keywords: Internal combustion engines, dynamic engine testing, design of experiment, stationary based approximation, test sequence optimisation.

Scientific field: Mechanical Engineering

Scientific subfield: Internal Combustion Engines

UDC: 621.43(043.3)



Sadržaj

Spisak slika	viii
Spisak tabela	xvi
1. Uvod	1
1.1. Uticaj i budući razvoj motora SUS	1
1.2. Motivacija za istraživanje	5
1.3. Pregled rada	8
2. Kalibracija upravljačkih parametara motora SUS	12
2.1. Osnovna kalibracija upravljačkih parametara	14
2.2. Modelski zasnovana kalibracija upravljačkih parametara	16
2.2.1. Posredna i direktna modelski zasnovana kalibracija	19
3. Matematički modeli u procesu kalibracije	23
3.1. Linearni matematički modeli	26
3.2. Nelinearni matematički modeli	30
3.2.1. Funkcije radijalne osnove	33
3.2.2. Funkcije Gausovog procesa	37
3.2.3. Dinamički nelinearni modeli	39
4. Plan ispitivanja motora SUS	42
4.1. Kvizistacionarno ispitivanje motora SUS	43
4.1.1. Centralni kompozitni dizajn	45
4.1.2. Optimalni plan	47
4.1.3. Pravilo latinskih kvadrata	50
4.1.4. Kvazi-nasumične sekvence	52
4.2. Dinamička ispitivanja motora SUS	55
4.2.1. Nasumične dinamičke sekvence	58
4.2.2. Nagibne funkcije	60
4.2.3. Nagibne funkcije sa zadržavanjem	62

4.2.4.	Višestruke harmonijske funkcije	64
4.2.5.	Harmonijske funkcije promenljive frekvence	66
4.2.6.	Vozni ciklusi	69
5.	Sistemi ispitnog stola za stacionarno i dinamičko ispitivanje motora	73
5.1.	Akvizicija podataka u vremenskom domenu	78
5.2.	Indiciranje motora SUS	79
5.3.	Aplikacija za automatizovano definisanje radnog režima motora	83
5.3.1.	Integracija MODBUS protokola	86
6.	Dinamičko ispitivanje motora metodom SDN	93
6.1.	Teorijske osnove metode SDN	94
6.2.	Uslovi za sprovođenje dinamičkog testa	99
6.3.	Praktična realizacija testa sa SDN	103
6.3.1.	Test sa SDN i stacionarnom pripremom sistema	104
6.3.2.	Test sa SDN i dinamičkom pripremom sistema	106
6.4.	Stacionarna aproksimacija dinamičkog odziva	109
6.5.	Analiza parametara ovojnice odziva pri SDN	117
7.	Rezultati dinamičkog ispitivanja motora metodom SDN	123
7.1.	Stacionarne aproksimacije rezultata sa SDN	123
7.2.	Analiza rezultata stacionarne aproksimacije ispitivanja sa SDN	132
8.	Povećanje efikasnosti stacionarnog ispitivanja motora SUS	134
8.1.	Poređenje osnovnih stacionarnih modela	140
8.2.	Oblasti za dodavanje tačaka	144
8.3.	Algoritam za dodavanje tačaka	149
8.4.	Poređenje modela formiranih na osnovu proširenog plana ispitivanja	155
8.5.	Oblasti za dodavanje tačaka određene ispitivanjem sa SDN	158
9.	Redosled sprovođenja stacionarnih radnih režima tokom ispitivanja	164
9.1.	Postavka „Problema trgovačkog putnika”	165
9.1.1.	Kristofidesov algoritam	169
9.1.2.	Zamena parova ruta	170
9.2.	Rešavanje „Problema trgovačkog putnika” primenom genetskog algoritma	171
9.3.	Optimalan redosled na osnovu rezultata ispitivanja sa SDN	175
10.	Zaključak i smernice za budući rad	180

A. Dodatak	184
Pregled korišćenih oznaka	194
Bibliografija	200
Biografija	222

Spisak slika

1.1. Procena prodaje različitih tipova pogonskih sistema za nova putnička vozila u Evropi za period od 2016. do 2030. godine [7].	3
2.1. Primer sistema dopremanja svežeg punjenja savremenog dizel-motora [14].	13
2.2. Poređenje položaja optimuma pri sprovođenju kalibracije pravovremenim variranjem jednog upravljačkog parametra i položaja globalnog optimuma [30].	15
2.3. Koncept modelski zasnovane kalibracije (<i>IAV Z-Process</i>) [36].	17
2.4. Primeri ulaznih i izlaznih veličine koje se analiziraju prilikom sprovođenja modelski zasnovane kalibracije [38].	18
2.5. Šematski prikaz posredne modelski zasnovane kalibracije upravljačkih parametara motora SUS.	21
2.6. Šematski prikaz direktne modelski zasnovane kalibracije upravljačkih parametara motora SUS.	22
3.1. Šematski prikaz određivanja greške matematičkog modela.	24
3.2. Veštačka neuronska mreža sačinjena od nelinearnih osnovnih funkcija i odgovarajućih linearnih težinskih faktora [43].	26
3.3. Šematski prikaz perceptrona jednog sloja VNM [44].	31
3.4. Šematski prikaz VNM sa više skrivenih slojeva (VSNM) [44].	33
3.5. Veštačka neuronska mreža sačinjena od funkcija radijalne osnove (FRO) i odgovarajućih težinskih faktora [43].	35
3.6. Primer aproksimacije funkcijom Gausovog procesa.	39
3.7. Dinamički proces modeliran stacionarnim aproksimatorom i serijom q^{-1} filtera [43].	40
3.8. Dinamička neuronska mreža (NARX) sa rekurentnim vezama i elementima za vremenski otklon (označeni sa TDL) [44].	40
4.1. Stabilizacija posmatrane merene veličine nakon promene radnog režima [34].	43

4.2.	Plan punog opsega (a), centralni kompozitni plan (b) i Boks-Benken (Box-Behnken) plan (c) za tri nezavisne promenljive [67].	46
4.3.	D-optimalni plan za 100 tačaka unutar radnog polja motora za polinomske matematičke modele različitog reda.	49
4.4.	Plan ispitivanja unutar radnog polja motora za 100 nasumično izabranih radnih režima i režimi dobijeni primenom metode latinskog hiperprostora.	51
4.5.	Plan ispitivanja unutar radnog polja motora za 100 tačaka odabranih primenom Haltonove i Sobolove sekvence.	55
4.6.	Amplitudno modulirana nasumična binarna sekvenca i odzivi različitih nelinearnih sistema.	59
4.7.	Stacionarna aproksimacija odziva sistema u funkciji upravljačke veličine varirane po metodi APNBS.	60
4.8.	Pobuda nagibnim funkcijama i odzivi različitih nelinearnih sistema.	61
4.9.	Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog nasumičnim nagibnim funkcijama.	62
4.10.	Pobuda nagibnim funkcijama sa zadržavanjem i odzivi različitih nelinearnih sistema.	63
4.11.	Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog nasumičnim nagibnim funkcijama sa zadržavanjem.	63
4.12.	Pobuda višestrukom harmonijskom funkcijom i odzivi različitih nelinearnih sistema.	65
4.13.	Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog višestrukim harmonijskim funkcijama.	65
4.14.	Harmonijska funkcija promenljive frekvence i odzivi različitih nelinearnih sistema.	67
4.15.	Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog harmonijskom funkcijom promenljive frekvence.	68
4.16.	Poređenje zastupljenosti radnog režima motora za testove NEDC, WLTP i RDE [109].	72
5.1.	Šema laboratorijske instalacije.	76
5.2.	Funkcionalna šema indiciranja pritiska u cilindru motora.	80
5.3.	Šema sistema probnog stola za automatizovano sprovođenje plana ispitivanja.	84
5.4.	Izgled korisničkog panela za lokalni pristup parametrima kontrolera kočnice.	85

5.5. Primer <i>Producer/Consumer</i> arhitekture u okviru NI LabVIEW programskog okruženja [146].	89
5.6. Promena upravljačkog parametra pri definisanju dinamičkog testa kao niza uzastopnih stacionarnih tačaka sa različitim vremenom stabilizacije.	91
5.7. Promena upravljačkog parametra pri realizaciji dinamičkog testa kao niza uzastopnih rampi različitog trajanja.	92
5.8. Fotografija laboratorijske instalacije za predmetno izstaživanje na Katedri za motore SUS.	92
6.1. Otklon izlazne veličine linearnog sistema prvog reda sa vremenskom konstantom $T_1 \neq 0$ u odnosu na stacionarnu karakteristiku sistema ($T_1 = 0$).	97
6.2. Primer pobude i odziva linearnog sistema prvog reda.	98
6.3. Primer pobude i odziva nelinearnog sistema prvog reda.	99
6.4. Primer odziva lineanog sistema prvog reda na pobudu pobudu sa SDN nakon isteka perioda stabilizacije.	101
6.5. Primer odziva lineanog sistema prvog reda na pobudu sa SDN nakon uvođenja sistema u režim ponovljivih oscilacija.	101
6.6. Stacionarna aproksimacija odziva dinamičkog sistema ispitivanog metodom SDN sa stacionarnom i dinamičkom pripremom.	102
6.7. Relativne razlike između srednje linije ovojnice izlazne veličine i stacionarnih vrednosti odziva posmatranog sistgema.	103
6.8. Globalni prostor nezavisnih upravljačkih veličina i položaji ispitanih stacionarnih radnih režima.	104
6.9. Teorijski zahtev u pogledu opterećenja motora (AVL CAMEO) i zahtev za opterećenje motora prosleđen od strane kontrolera kočnice ka EUJ pri sprovođenju testa sa SDN i stacionarnom pripremom (SP) pri 1500 min^{-1}	106
6.10. Željena i realizovana promena opterećenja motora za testove sa SDN i stacionarnom pripremom sistema (SP) pri 1500 min^{-1}	106
6.11. Radni režimi obuhvaćeni dinamičkim ispitivanjem i pravci promene optrećenja pri ispitivanju metodom SDN za stacionarnu i dinamičku pripremu sistema.	107
6.12. Teorijski zahtev u pogledu opterećenja motora (AVL CAMEO) i zahtev za opterećenje motora prosleđen od strane kontrolera kočnice ka EUJ pri sprovođenju testa sa SDN i dinamičkom pripremom (DP) pri 1500 min^{-1}	108

6.13. Željena i realizovana promena opterećenja motora za testove sa SDN i dinamičkom pripremom sistema (DP) pri 1500 min^{-1}	109
6.14. Promena temperature T_{31} za različite dužine trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1}	110
6.15. Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za T_{31} za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1}	111
6.16. Osrednjene vrednosti gradijenata dinamičke pobude za test sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1}	112
6.17. Promena apsolutnog pritiska P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1}	113
6.18. Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1}	113
6.19. Promena temperature T_{31} za različite dužine trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1}	114
6.20. Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za T_{31} za različite dužine trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1}	115
6.21. Osrednjene vrednosti gradijenata funkcije pobude pri realizaciji testa sa SDN započetog sa dinamičkog režima pri 1500 min^{-1}	115
6.22. Promena apsolutnog pritiska P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1}	116
6.23. Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1}	117
6.24. Parametri ovojnice temperature izduvnih gasova T_{31} za ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema.	118
6.25. Parametri ovojnice temperature izduvnih gasova T_{31} za ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema.	119
6.26. Parametri ovojnice pritiska u usisnom kolektoru P_{21} za ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema.	119
6.27. Parametri ovojnice pritiska u usisnom kolektoru P_{21} za ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema.	120
6.28. Oblik ovojnice srednjeg indikatorskog pritiska (IMEP) za različite vrednosti otklona vremenskog domena indiciranih kanala za dinamički test D120 pri 1500 min^{-1}	121

6.29. Relativne razlike srednje linije ovojnice u odnosu na stacionarni IMEP za različite vrednosti odklona vremenskog domena indiciranih kanala za test D120 pri 1500 min^{-1}	121
6.30. Parametri ovojnice srednjeg indiciranog pritiska u funkciji brzinskog režima i trajanja testa sa SDN.	122
7.1. Specifična efektivna potrošnja goriva (BSFC) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.	124
7.2. Specifična efektivna potrošnja goriva (BSFC) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.	125
7.3. Temperatura izduvnih gasova u izduvnom kolektoru (T_{31}) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.	126
7.4. Temperatura izduvnih gasova u izduvnom kolektoru (T_{31}) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.	127
7.5. Temperatura izduvnih gasova izmerenih iza turbine (T_{41}) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.	128
7.6. Temperatura izduvnih gasova izmerenih iza turbine (T_{41}) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.	129
7.7. Pritisak izmeren iza kompresora (P_{21}) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.	130
7.8. Pritisak izmeren iza kompresora (P_{21}) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.	131
8.1. Funkcionalna šema analize rezultata kvazistacionarnih ispitivanja sa aspekta redukovanog broja radnih režima generisanih posredstvom DE algoritma.	135
8.2. Pravac prostiranja radnih režima stacionarnog ispitivanja motora.	137
8.3. Pravac prostiranja radnih režima generisanih algoritmom DE - Haltonova sekvenca od 120 radnih režima.	138
8.4. Pozicije radnih režima generisani Haltonovom sekvencom i oblast validnosti modela za različiti broj radnih režima.	139
8.5. Raspodela relativnih razlika referentnog modela i matematičkih modela formiranih nad redukovanim brojem tačaka za parametar P_{21}	142
8.6. Raspodela relativnih razlika referentnog modela i matematičkih modela formiranih nad redukovanim brojem tačaka za parametar T_{21}	143

8.7. Raspodela relativnih razlika referentnog modela i matematičkih modela formiranih nad redukovanim brojem tačaka za parametar T_{31}	143
8.8. Primer stacionarnog procesa i oblici linearne aproksimacije kao funkcije pozicije tačaka na kojima je poželjno sprovesti ispitivanje.	144
8.9. Normalizovane apsolutne vrednosti prvog i drugog izvoda proizvoljnog procesa i oblasti za dodavanje tačaka.	146
8.10. Kvantifikovanje oblasti (F_{uslov}) za dodavanje tačaka, pozicije podmodela aproksimacije <i>Lolimot</i> i granica oblasti za dodavanje tačaka određena za pritisak u usisnom koektoru motora P_{21}	148
8.11. Funkcija uslova (kvantifikovanje oblasti) za dodavanje tačaka, pozicije podmodela aproksimacije <i>Lolimot</i> i granica oblasti za dodavanje tačaka određena za temperaturu u usisnom koektoru motora T_{21}	149
8.12. Algoritam za dodavanje tačaka unutar radnog polja motora na osnovu postojećeg plana ispitivanja i poznate funkcije uslova (F_{uslov}) za dodavanje tačaka.	150
8.13. Delonijeva triangulacija prostora globalnih upravljačkih veličina opisanog inicijalnim tačkama plana ispitivanja i pozicije težišta dobijenih trouglova (tačke kandidati).	152
8.14. Pozicije tačaka kandidata koje se nalaze unutar oblasti za dodavanje tačaka i ilustracija ispunjenosti uslova maksimizacije minimalnog međusobnog udaljenja između tačaka dizajna.	152
8.15. Pozicije radnih režima u normalizovanom radnom polju nakon nekoliko iteracija dodavanja tačaka, Delonijeva triangulacija i set tačaka kandidata za narednu iteraciju.	153
8.16. Inicijalni plan ispitivanja od 30 tačaka Haltonove sekvence i dodatnih 15 tačaka unutar oblasti za dodavanje tačaka (DE 30+15).	153
8.17. Inicijalni plan ispitivanja od 60 tačaka Haltonove sekvence i dodatnih 15 tačaka unutar oblasti za dodavanje tačaka (DE 60+15).	154
8.18. Inicijalni plan ispitivanja od 90 tačaka Haltonove sekvence i dodatnih 15 tačaka unutar oblasti za dodavanje tačaka (DE 90+15).	154
8.19. Raspodela relativnih razlika parametra P_{21} za referentni model i modele formirane nad osnovnim DE i planom ispitivanja sa dodatim tačkama.	155
8.20. Raspodela relativnih razlika parametra T_{21} za referentni model i modele formirane nad osnovnim DE i planom ispitivanja sa dodatim tačkama.	156

8.21. Raspodela relativnih razlika parametra T_{31} za referentni model i modele formirane nad osnovnim DE i planom ispitivanja sa dodatim tačkama.	157
8.22. Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema za parametar P_{21}	159
8.23. Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema za parametar P_{21}	160
8.24. Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom (SP) sistema za parametar T_{21}	161
8.25. Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom (DP) sistema za parametar T_{21}	161
8.26. Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema za parametar T_{31}	162
8.27. Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema za parametar T_{31}	163
9.1. Zamena ruta u paru (2-OPT algoritam).	170
9.2. Struktura genetskog algoritma primenjenog pri rešavanju problema optimalnog redosleda izvršavanja stacionarnih radnih režima tokom ispitivanja motora.	172
9.3. Iterativne promene potencijalnih putanja pri rešavanju PTP i identifikacija dominantne putanje (<i>dominantnog gena</i>).	174
9.4. Promene (mutacije) vektora putanje pri rešavanju PTP pomoću genetskog algoritma.	175
9.5. Različiti redosledi izvršavanja radnih režima pri stacionarnom ispitivanju motora.	176
9.6. Kumulativni otklon temperature izduvnih gasova T_{31} za optimalne redoslede izvršavanja formirane na osnovu različitih modela stacionarne aproksimacije.	177
9.7. Redosled izvršavanja radnih režima stacionarnog ispitivanja određen genetskim algoritmom za različite modele temperature izduvnih gasova (T_{31}).	178

9.8. Medusobna razlika temperature T_{31} (matrica distanci) na režimi-
ma DE 30+15 prema S120 modelu za nasumični i skoro optimalni
redosled izvršavanja prema. 179

Spisak tabela

4.1. Osnovne karakteristike voznih ciklusa WLTC, FTP 75, NEDC, JC08 [105].	71
5.1. Karakteristike motorske kočnice.	74
5.2. Osnovni podaci o ispitivanom motoru.	74
5.3. Pregled oznaka fizičkih veličina merenih u vremenskom domenu.	77
5.4. Spisak tipova registara MODBUS TCP/IP protokola.	86
5.5. Upravljački modovi kontrolera motorske kočnice Rotronics PGB301.	87
5.6. Primer komande upućene od strane softvera AVL CAMEO ka centralnom sistemu za automatizaciju probnog stola za ispitivanje motora.	88
6.1. Ukupna trajanja dinamičkih testova započelih stacionarnim radnim režimom (SP) [25].	105
6.2. Konfiguracija testova sa SDN koji započinju dinamičkim radnim režimom (DP).	108
7.1. Lista univerzalnih dijagrama na kojima je prikazan deo rezultata dinamičkog ispitivanja.	123
8.1. Osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih nad redukovanim setom tačaka za parametar P_{21}	141
8.2. Osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih nad redukovanim setom tačaka za parametar T_{21}	142
8.3. Osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih nad redukovanim setom tačaka za parametar T_{31}	143
8.4. Osnovne karakteristike i statistički parametri aproksimacija stacionarnog odziva sistema sa slike 8.8.	146

8.5. Osnovne karakteristike i statistički parametri matematičkih modela koji opisuju promenu pritiska u usisnom kolektoru motora (P_{21}).	155
8.6. Osnovne karakteristike i statistički parametri matematičkih modela koji opisuju promenu temperature u usisnom kolektoru motora (T_{21}).	156
8.7. Osnovne karakteristike i statistički parametri matematičkih modela koji opisuju promenu temperature u izduvnom kolektoru motora (T_{31}).	157
A.1. Spisak promenljivih koje su praćene posredstvom dijagnostičkog OBD II interfejsa.	185
A.2. Komponente korišćene akvizicione platforme NI PXI.	186
A.3. Opis i osnovne karakteristike korišćenih senzora na mernoj instalaciji.	187
A.4. Pozicije na šematskom prikazu laboratorijske instalacije za ispitivanje motora (slika 5.1).	188
A.5. Osnovne tehničke karakteristike opacimetra AVL 439.	189
A.6. Tehničke karakteristike korišćenog enkodera.	190
A.7. Tehničke karakteristike akvizicione platforme za indiciranje motora.	190
A.8. Senzori za indiciranje pritiska u cilindru motora.	191
A.9. Karakteristike pojačivača punjenja za piezoelektrične senzore pritiska.	192
A.10. Konfiguracija PC računara korišćenog za formiranje matematičkih modela.	193

1. Uvod

Istraživač Nikolaus Oto (Nikolaus Otto) promenio je svet svojim pronalaskom iz 1876. godine. Tada je prvi put uspešno testiran četvorotaktni klipni motor sa unutrašnjim sagorevanjem na čijim principima funkcionišu današnji benzinski motori, odnosno motori sa paljenjem varnicom. Nešto kasnije, 1890. godine istraživač Rudolf Diesel (Rudolf Dizel) patentirao je kružni termodinamički ciklus na osnovu koga je razvijen prvi dizel-motor. Od tog vremena do danas, motori SUS se neprekidno unapređuju zahvaljujući sakupljenim znanjima o radnom procesu motora, primeni novih tehnologija, zahtevima tržišta u smislu različitih varjanti motora SUS i regulativama o zaštiti životne sredine koje novi motori moraju da zadovolje. U načelu, motori SUS su mašine koje pretvaraju hemijsku energiju goriva u mehanički rad, a njihovu upotrebu prati niz pogodnosti zbog kojih su sastavni deo zahteva privrede i životnih navika pojedinca. Naravno, postoje i određeni nedostaci koji karakterišu njihovu upotrebu i shodno tome, ulažu se izuzetni naučno-istraživački naponi kako bi se performanse, jedne takve mašine, podigle na viši nivo.

1.1. Uticaj i budući razvoj motora SUS

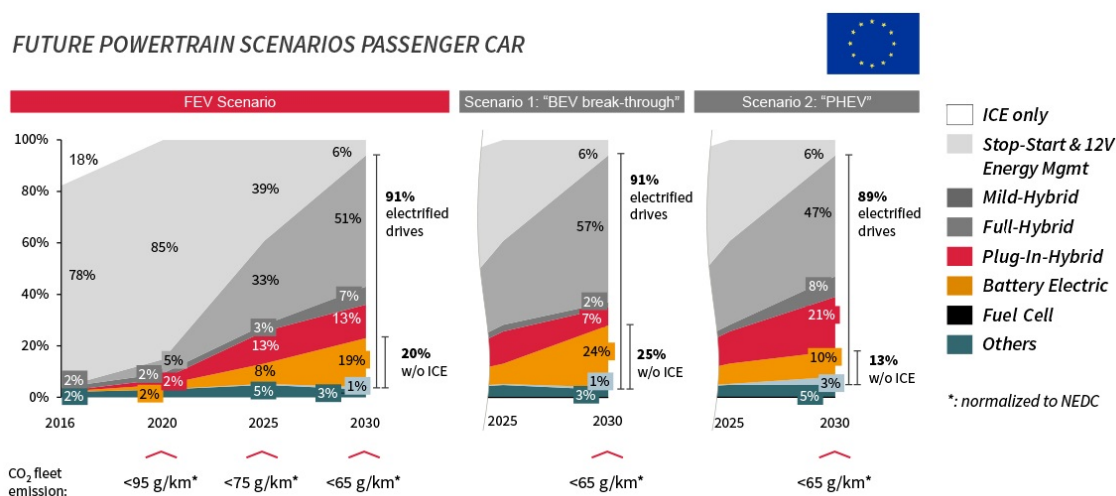
Kada se pomenu motori SUS, prvu asocijaciju čine motorna vozila i zagađenje koje je posledica njihove upotrebe u urbanim sredinama. Shodno tome, razvoj i testiranje današnjih motora SUS usko je povezano sa regulativama o zaštiti životne sredine, tj. strogim ograničenjima koja se postavljaju u pogledu dozvoljenog sadržaja štetnih komponenti izduvne emisije. Prve regulative primenjene su 1966. godine kada je Odbor za vazdušne resurse Kalifornije doneo odluku o dozvoljenim emisijama ugljovodonika i ugljen-monoksida u državi Kalifornija [1]. Šezdesetih godina prošlog veka, ovi propisi počinju da se primenjuju na celoj teritoriji SAD, a od 1970. i u Japanu i evropskim zemljama. Kako se svest o štetnim posledicama izduvne emisije motora podizala na viši nivo, tako su i propisi koji regulišu tu oblast postajali sve strožiji i povećavala se potreba za razvojem novih tehnologija kojima se

smanjuje štetna emisija. Na primer, emisija ugljen-monoksida savremenog motora sa paljenjem varnicom čini svega 2-3% emisije sličnog motora iz 1970. godine. Ova-ko znatna smanjenja emisije odnose se i na ostale štetne produkte sagorevanja, kao što su nesagoreli ugljovodonici, azotovi oksidi i čestice kako kod dizel tako i kod benziskih motora sa direktnim ubrizgavanjem goriva.

Industrija koja stoji iza razvoja, proizvodnje i plasiranja na tržište motora SUS igra zanačajnu ulogu na polju globalne energetike, a posebno u oblasti transporta i upotrebe mehanizacije. Krajem dvadesetog veka, motori SUS su imali apsolutno dominantnu poziciju u smislu pogona suvozemnog transporta sa udelom od oko 99% posmatrano kroz energetski zahtev potrošača [2]. Danas smo svedoci određenih promena u domenu sistema pogona putničkih vozila. Elektrifikacija drumskog saobraćaja i plasiranje na tržište sve većeg broja modela automobila na isključivo električni pogon (eng.: *BEV - Battery Electric Vehicle*) veoma je značajna i u velikoj meri će uticati na trendove u auto-industriji i na pogonske sisteme budućnosti. Takođe, mediji dosta pažnje posvećuju *automotive* segmentu, a posebno nakon događaja vezanih za „Dizel-skandal” Volkswagen grupe kada je krajem 2015. godine obelodanjen deo algoritma upravljačke jedinice motora koji prepoznaje uslove testiranja izduvne emisije i prilagođava upravljanje pogonskim sistemom samo za tu priliku [3, 4]. Kao posledica ovog događaja mnoge zemlje Evrope i SAD redukovale su uvoz, proizvodnju i prodaju vozila sa dizel-motorima. Među njima prednjači Norveška koja beleži prodaju od 47% novih, isključivo električnih, vozila u 2017. godini. U međuvremenu, nevladine organizacije koje se bave očuvanjem životne sredine u Nemačkoj, nakon nekoliko godina, uspele su da izbore zabranu ulaska starijih vozila sa dizel-motorima u zone strogog centra grada za veće metropole. Tokom 2019. godine ova zabrana je primenjena u 14 gradova u Nemačkoj i u mnogim većim gradovima Evrope. U medijima je objavljena izjava grupacije Continental, koja je jedan od vodećih snabdevača svetske auto-industrije, u kojoj se navodi da će Nemački proizvođači automobila (Volkswagen, Daimler i BMW) obustaviti dalji razvoj motora SUS do 2023. godine i da će svoje razvojne resurse usmeriti isključivo ka potpuno električnim automobilima [5]. Auto-industriji, koja je jedna od najbogatijih industrija u primarnom ekonomskom sektoru, ovakve izjave odgovaraju jer privlače veliki publicitet, ali pitanje je koliko su opravdane i tačne.

Na osnovu analiza nezavisnih institucija i brojnih kompanija petrohemijske industrije, prognoze za blisku budućnost, ipak čvrsto stoje na strani motora SUS. Na slici 1.1 prikazani su očekivani trendovi prodaje putničkih vozila na osnovu rezultata istraživanja koje je sprovedla jedna od vodećih konsultantskih kuća auto-industrije,

nemački *FEV*. Procenjuje se da će do 2050. godine na području Evrope i SAD biti od 10% do 20% vozila na isključivo električni pogon, dok će ostatak činiti pogonski sistemi koji imaju motor SUS [6, 7]. Takođe, tek se očekuje veća motorizacija južnoameričkog kontinenta, Bliskog istoka i centralne Azije, a predviđa se globalni godišnji rast prodaje motora SUS od 4.9% na godišnjem nivou za period od 2018. do 2025. godine [8]. Organizacije za zaštitu ljudskih prava osuđuju proizvodnju električnih automobila jer se predstavlja kao prijatelj okoline, dok proizvodi baterije upotrebom fosilnih goriva i na neetički način prikuplja neophodne sirovine za njihovu proizvodnju u zemljama centralne Afrike [9]. Nakon ukidanja subvencija Norveške vlade, prodaja električnih vozila je opala i trenutno električna vozila broje oko 6% od ukupnog broja putničkih vozila te zemlje, dok je na svetskom nivou, u ovom momentu, svega od 1% do 1.6% električnih vozila u upotrebi. Evropski parlament i nevladine organizacije koje se bore za očuvanje životne sredine, nastoje da smanje zavistnost evropske elektro-mreže od eksploatacije rude uglja u tremoelektranama do 2030. godine i da se elektorprivreda više oslanja na „čiste” izvore energije u budućnosti [10]. Sa povećanjem broja električnih automobila, tranzicija ka obnovljivim izvorima energije neće biti jeftina, što će uticati na ograničenu zastupljenost ovakvih vozila.



Slika 1.1.: Procena prodaje različitih tipova pogonskih sistema za nova putnička vozila u Evropi za period od 2016. do 2030. godine [7].

Emisija ugljen-dioksida kao posledica eksploatacije motornih vozila iznosi oko 12% emisije CO_2 ukupne evropske privrede [11]. Veruje se da je CO_2 gas koji doprinosi stvaranju efekta staklene bašte i da redukovana emisija ovog gasa može da spreči klimatske promene i globalno zagrevanje. Od 2009. godine u Evropi važe propisi koji uvode ograničenja dozvoljene emisije CO_2 po pređenom kilometru flote putničkih vozila jednog proizvođača ili grupacije proizvođača. Plan za 2015. godinu predviđao

je ograničenje specifične emisije novih putničkih vozila od $130 \text{ gCO}_2/\text{km}$, tj. srednju potrošnju goriva od oko $5.6 \text{ l}/100\text{km}$ za vozila sa benzinskim motorima i potrošnju od oko $4.9 \text{ l}/100\text{km}$ za vozila sa dizel-motorima. Proizvođači su uspjeli da ostvare zacrtan cilj pre isteka roka, tačnije 2013. godine, a statistika pokazuje da je prosečna emisija CO_2 novih vozila registrovanih u Evropi u toku 2017. godine iznosila $118.5 \text{ gCO}_2/\text{km}$, što je znatno manje u poređenju sa prosekom iz 2010. godine kada je ova vrednost iznosila oko $141 \text{ gCO}_2/\text{km}$.

Sledeće ograničenje specifične emisije od $95 \text{ gCO}_2/\text{km}$ planirano je za 2020. godinu, ali je već prolongirano za godinu dana unapred jer usavršavanje sistema pogona putničkih vozila iziskuje veoma naprednu i skupu tehnologiju u svim segmentima razvoja vozila. Flota novih registrovanih vozila jednog proizvođača, nakon 2021. godine, moraće da ima prosečnu specifičnu emisiju nižu od $95 \text{ gCO}_2/\text{km}$, odnosno potrošnju nižu od $4.1 \text{ l}/100\text{km}$ za benzinske i $3.6 \text{ l}/100\text{km}$ za dizel-motore, jer će se u suprotnom sprovesti finansijsko kažnjavanje proizvođača putem takozvanih „ CO_2 kredita” (eng.: *Carbon Credits*). Ovom regulativom, proizvođači vozila su primorani da na tržište plasiraju potpuno električna vozila jer je za takva vozila direktno merena specifična emisija CO_2 niža od $50 \text{ gCO}_2/\text{km}$, što donosi određene olakšice pri obračunu ukupne emisije flote datog proizvođača.

Iako kod BEV, direktno merena emisija CO_2 deluje sjajno, najnovija istraživanja ukazuju da je ukupna emisija CO_2 kod ovakvih vozila znatno veća nego kod klasičnih motornih vozila, posmatrano po pređenom kilometru za radni vek baterije od 10 godina i za autonomiju od 15000 km godišnje [12]. Eksploatacija i reciklaža litijuma, kobalta i mangana, koji se koriste u proizvodnji baterija, je visokoenergetski proces koji ima za posledicu visoku emisiju CO_2 . Zahvaljujući ovoj činjenici, a prema studiji [13], električna vozila pre perioda eksploatacije prosečno emituju između $73 \text{ gCO}_2/\text{km}$ do $98 \text{ gCO}_2/\text{km}$. Kada se uzme u obzir efikasnost punjenja i pražnjenja baterija, kao i efikasnost punjača, uz proizvodnju električne energije sagorevanjem uglja u termoelektrani, prosečna emisija CO_2 električnog automobila iznosi od $232 \text{ gCO}_2/\text{km}$ do $257 \text{ gCO}_2/\text{km}$, što je znatno više od prethodno pomenutih vozila „nulte emisije” (eng.: *ZEV - Zero Emission Vehicle*) i emisije vozila sa konvencionalnim motorima SUS novije generacije.

1.2. Motivacija za istraživanje

Pojam „ugljenični otisak” (eng.: *Carbon Footprint*), tj. analize ukupne emisije gasova koji mogu da izazovu efekat „staklene bašte” tokom proizvodnje, eksploatacije i reciklaže veoma su značajne pri određivanju uticaja motornih vozila i pogonskih sistema na naše okruženje. U tom smislu, ograničenja emisije CO_2 i drugih štetnih komponenti izduvne emisije, u segmentu putničkog i komercijalnog drumskog transporta, uslovljavaju ulaganja proizvođača u istraživanja pri razvoju i implementaciji novih tehnoloških rešenja koja doprinose daljem usavršavanju motora SUS i povećanju ukupne termičke efikasnosti pogonskog sistema.

Na tržištu su već neko vreme dostupni motori koji kombinuju prednosti klasičnih benzinskih i dizel-motora. Tako na primer, HCCI (eng.: *Homogeneous Charge Compression Ignition*) motori usisavaju homogenu smešu, poput benzinskih motora sa indirektnim ubrizgavanjem, dok se uslovi za paljenje smeše obezbeđuju usled povišene temperature i pritiska radnog medijuma u toku sabijanja, što je princip preuzet sa dizel-motora. Ovakvi motori kombinuju nisku emisiju toksičnih izduvnih gasova savremenih benzinskih motora i visok stepen korisnosti dizel-motora. Takođe, PCCI (eng.: *Premixed Charge Compression Ignition*) motori, zbog primenjenog koncepta direktnog ubrizgavanja i globalno nehomogenog sastava smeše, čije je paljenje posledica visokog stepena sabijanja, imaju još niže vrednosti emisije azotovih oksida i čestica, uz zadržavanje ekonomičnosti HCCI motora. Kontrola procesa paljenja kod ovakvih motora predstavlja poseban problem jer do paljenja smeše može doći u bilo kom trenutku nakon dostizanja uslova samozapaljenja, za razliku od klasičnih benzinskih i dizel-motora kod kojih je trenutak početka sagorevanja preciznije kontrolisan. Poznavanje fizičkih procesa paljenja smeše i mogućnost brze kontrole parametara koju utiču na stanje radnog medijuma na kraju sabijanja su ključni za funkcionisanje ovakvih motora. Varijabilni stepen sabijanja, temperatura usisne smeše ili vazduha, udeo izgubnih gasova u svežem punjenju, kontrola sistema razvoda i sastava smeše su parametri koji najviše utiču na pouzdano paljenje kod HCCI i PCCI motora.

Intenzivno se radi na razvoju motora sa paljenjem varnicom koji poseduju sisteme sa izuzetno visokim pritiskom ubrizgavanja goriva (do 1200 bar) sa idejom drastičnog skraćivanja vremena potrebnog za obrazovanje homogene semeše na režimima povišenog opterećenja motora, a pre pojave uslova za detonantno sagorevanje. Verzije benzinskih motora sa pretkomorom, TJI (eng.: *Turbulent Jet Ignition*) i PCI (eng.: *PreChamber Injection*), su tehnologije koje zahtevaju preciznu kontrolu tre-

nutka i pritiska ubrizgavanja uz optimizovano višestruko ubrizgavanje u toku radnog ciklusa. Dodatno povećanje ekonomičnosti motora SUS postiže se primenom radnog ciklusa kod koga je stepen ekspanzije veći od stepena sabijanja, što je 1887. godine patentirao pronalazač Džejms Atkinson (James Atkinson), a 1957. godine korz svoj rad usavršio istraživač Ralf Miler (Ralph Miller). Motori koji funkcionišu na principima Miler-Atkinsonovog radnog ciklusa su danas komercijalno dostupni. Odlikuje ih nešto niža litarska snaga i primena veoma složenih sistema za kontrolu varijabilnog sistema razvoda, ali i povećana ekonomičnost.

Efektivni stepen korisnosti motora SUS funkcija je velikog broja parametara. Konstrukciona rešenja i primenjeno upravljanje daće različite vrednosti specifične potrošnje goriva u radnom području motora okarakterisanim kroz broj obrtaja i opterećenje motora. U tom smislu, hibridni pogonski sistemi omogućavaju veću zastupljenost ekonomičnih radnih režima motora SUS tokom eksploatacije. Naravno, hibridne pogonske sisteme prate i određeni nedostaci sa aspekta projektovanja, ispitivanja i optimizacije, a najviše se ogledaju kroz povećanu kompleksnost upravljanja. Takođe, viša cena i ukupna masa vozila, komplikovano održavanje i dijagnostika ograničavaju masovnu upotrebu ovakvih pogonskih sistema na tržištu.

Primena navedenih tehnologija i pratećih sistema koji doprinose poboljšanju performansi motora SUS sa aspekta razvijene snage, ekonomičnosti, toksičnosti i sastava izduvnih gasova dodatno opterećuje razvojne resurse. Sa povećanjem broja ovakvih sistema i sa njihovim dodatnim usavršavanjem, ukupan broj upravljačkih parametara raste eksponencijalno, što za posledicu ima ogroman rast broja potencijalnih radnih režima motora od kojih samo neki mogu da se okarakterišu kao uslovno optimalni.

Optimizacija upravljanja, odnosno pronalaženje kombinacije upravljačkih parametara koji će da rezultuju najprihvatljivijim performansama motora, rezultat je analize, kompromisa i manipulacije podacima koji se, uobičajeno, dobijaju kvazistacionarnim ispitivanjem motora. Sa druge strane, kvazistacionarno ispitivanje izrazito velikog broja radnih režima zahteva previše vremena koje je, sa aspekta savremenih tržišnih zahteva i vremenskih ograničenja za finalizaciju proizvoda, jednostavno neprihvatljivo. Zbog ove činjenice, sprovode se istraživanja na polju ispitivanja motora kako bi se pronašao način da se neophodno vreme ispitivanja motora što više skрати, uz zadržavanje ili čak poboljšanje kvaliteta konačnih rezultata merenja. Rezultati ispitivanja motora na kvazistacionarnom režimu su nesumnjivo najtačniji, ali pri razvoju prototipskog motora ili nekog njegovog podsistema, nivo predznanja o objektu je nedovoljan i u tom smislu je praktično nemoguće definisati odgovarajući, dovolj-

no mali, broj radnih tačaka čijim će se ispitivanjem dobiti najrelevantniji podaci za dalju optimizaciju upravljanja. Ovo, kao i brojna druga ograničenja, otvorila su prostor za istraživanje drugačijih pristupa ispitivanju motora i to pre svega modelski zasnovanom pristupu i metodama dinamičkog ispitivanja.

Predmet ove disertacije je istraživanje u oblasti dinamičkog ispitivanja motora primenom relativno spore promene upravljačkog parametra sa ciljem prikupljanja približnih informacija o stacionarnom odzivu ispitivanog motora, kako bi se kasnije te informacije u obliku predznanja iskoristile pri definisanju plana za naknadna kvazistacionarna ispitivanja motora. Metodologija promene upravljačkog parametra po zakonu rampe niskog gradijenta se u literaturi naziva SDS (*eng.: Slow Dynamic Slope*), što u bukvalnom prevodu znači *spor dinamički nagib* (u daljem tekstu SDN). Interpretacija rezultata kvazistacionarnog i dinamičkog ispitivanja biće sprovedena kroz formiranje matematičkih modela različitih kategorija, a u cilju određivanja što kvalitetnije aproksimacije posmatranih parametara u domenu radnog polja motora. Takođe, analizom pojedinih karakteristika tako formiranih matematičkih modela, biće pokazano da postoje određene oblasti radnog polja motora unutar kojih bi bilo poželjno povećati gustinu kvazistacionarnih ispitivanja kako bi se kvalitet globalnog matematičkog modela posmatrane veličine poboljšao. Relativno brzi dinamički testovi zasnovani na konceptu SDN, obezbeđuju informacije o ispitivanom motoru na osnovu kojih je moguće odrediti približno optimalan redosled izvršavanja kvazistacionarnih ispitivanja sa aspekta minimizacije neophodnog vremena stabilizacije radnog režima. Takođe, biće prikazana uporedna analiza različitih konfiguracija dinamičkog testa uz nadu da će ti rezultati dati skromni doprinos budućim istraživanjima u ovoj oblasti mašinstva.

Brojni radovi na temu ispitivanja motora kao složenog nelinearnog i dinamičkog sistema potvrđuju realnu potrebu industrije za daljim istraživanjima u ovoj oblasti [14, 15, 16]. Dinamička ispitivanja motora, zasnovana na metodi promene upravljačkog parametra po nagibnoj funkciji (rampi) su relativno stara [17], a sa razvojem sistema upravljanja probnim stolom za motore, njihov potencijal je sve veći. U radu [18] su prikazani rezultati dinamičkog ispitivanja motora primenom metode SDN nad upravljačkim parametrom koji je u direktnoj vezi sa opterećenjem motora. Opterećenje je varirano kontinualno u oblasti pozitivnog obrtnog momenta uz kratkotrajna zadržavanja na minimalnoj i maksimalnoj apsolutnoj vrednosti upravljačkog parametra. U ovom radu su prikazani rezultati samo dva, relativno brza ciklusa, simetrične promene upravljačkog parametra, a autor je najveću pažnju posvetio analizi odziva sistema za merenje sadržaja NOx u izduvnom gasu.

Pored praćenja promene efektivnih parametara rada motora na globalnom domenu upravljačkih veličina, u radu [19] je primenjena metoda SDN za potrebe optimizacije ugla pretpaljenja i sistema razvoda motora SUS, odnosno veličina koja su funkcija globalnih upravljačkih veličina. Kako bi ovakvo istraživanje moglo da se sprovede, probni sto istraživačkog centra AVL je bio opremljen sistemima za kontrolisano dinamičko upravljanje parametrima na nivou upravljačke jedinice motora, što predstavlja značajan izazov. Posebno pozitivni rezultati na polju primene metode SDN elaborirani su u radu [20], koji je nastao kroz saradnju automobilske industrije - kompanija BMW i AVL. U ovom radu posebna pažnja je posvećena kalibraciji upravljačkih parametara u blizini granice sigurnih, odnosno po ispitivani motor i mernu opremu, bezbednih kombinacija upravljačkih parametara. Kompanija MAZDA, kao jedna od vodećih kompanija po inovativnosti u oblasti svetske auto-industrije je, takođe u saradnji sa kompanijom AVL, vršila istraživanja na ovom polju [21].

Optimizacija upravljanja dizel-motora na tranzijentnim režimima analizirana je primenom slične metode i prikazana je u disertaciji [22]. U okviru ovog istraživanja, autor se posvetio analizi veoma brzih promena ubrizgane količine goriva, definisanih nagibnim funkcijama u vremenskom domenu, ali u cilju proučavanja odziva sistema u smislu ostvarenog efektivnog obrtnog momenta i eventualnih korekcija u smislu održavanja željenog sastava smeše. Inženjeri kompanije HONDA, su kroz istraživanje [23] objavili rezultate približenja kvazistacionarnim radnim režimima na osnovu dinamičkih ispitivanja (stacionarne aproksimacije) emisije čestica benzinskog motora sa direktnim ubrizgavanjem uz primenu metodologije SDN pri dinamičkom upravljanju parametara koji definiše početak ubrizgavanja u ugaonom domenu. Takođe, u ovom istraživanju je primanjena metoda SDN sa promenljivim gradijentima u okviru jedne dinamičke sekvence, kako bi se primenila sporija promena upravljanja unutar oblasti u kojima se očekuje veća emisija čestica. Potencijal navedene metodologije nije istražen do kraja i stoga se i dalje radi na njenom usavršavanju, a među najnovija istraživanja spadaju ona obavljena kroz saradnju Katedre za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu i kompanije AVL iz 2015. godine [24]. Takođe, deo rezultata ovog istraživanja je javno objavljen i dostupan u radovima [25, 26].

1.3. Pregled rada

U sledećem poglavlju prikazani su opšti koncepti kalibracije upravljačkih parametara elektronske upravljačke jedinice uz navođenje primera koji ukazuju na kompleksnost upravljačkog sistema motora SUS. Dat je osvrt na metode variranja sa-

mo jednog upravljačkog parametra u posmatnom vremenskom trenutku i na metode modelski zasnovane kalibracije (u daljem tekstu MZK, eng.: *MBC - Model Based Calibration*). Takođe, opisani su koraci koji se sprovode pri posrednoj kalibraciji (eng.: *offline*) i direktnoj (eng.: *online*) kalibraciji, koja podrazumeva iterativno smenjivanje procesa formiranja matematičkih modela i prikupljanja novih podataka prema planu ispitivanja.

Osnovne karakteristike aproksimativnih matematičkih modela koji se koriste pri kalibraciji upravljačkih parametra motora SUS su prikazane u okviru trećeg poglavlja. Polinomski, splajn i aproksimativni splajn modeli analizirani su sa aspekta njihovog postavljanja i načina za određivanje traženih koeficijenata modela. Ovakvi modeli, kao skupina podmodela određene nelinearnosti, poslužili su kao osnova za formiranje modela oblika veštačke neuronske mreže (u daljem tekstu VNM, eng.: *ANN - Artificial Neural Network*). Na primeru višeslojne VNM je ukazano na nelinearnost koja je posledica uzajamnog delovanja težinskih koeficijenata, a u nastavku su, u osnovnim crtama, opisane funkcije radijalne osnove (u daljem tekstu FRO, eng.: *RBF - Radial Basis Function*) i funkcije Gausovog procesa (eng.: *GP - Gaussian Process*) koje su primenjivane prilikom određivanja konkretnih aproksimacija na osnovu rezultata ispitivanja. Takođe, dat je osvrt na sve primenjivane osnovne funkcije (eng.: *kernel*) za koje su građeni matematički modeli. U okviru ovog poglavlja prokomentarisano je koncept matematičkih modela koji mogu da aproksimiraju dinamičku karakteristiku posmatranog procesa.

Primena određene kategorije matematičkih modela u direktnoj je vezi sa planom ispitivanja motora SUS i obrnuto. S tim u vezi, u okviru četvrtog poglavlja, objašnjeni su koncepti formiranja plana ispitivanja motora, počevši od stacionarnog plana ispitivanja koji podrazumeva primenu centralnog kompozitnog dizajna, kategoriju optimalnog dizajna, primenu latinskih kvadrata sve do kvazi-nasumičnih metoda uzorkovanja prema sekvencama Haltona (Halton) i Sobola (Sobol). Takođe prikazani su primeri odziva jednostavnog dinamičkog nelinearnog modela Vinera (Wiener) na dinamičke sekvence formirane prema planu dinamičkog ispitivanja. Za ovu kategoriju pobuda izabrane su: nasumične dinamičke sekvence, nagibne funkcije, nagibne funkcije sa zadržavanjem, višestruke harmonijske funkcije i harmonijske funkcije promenljive frekvence.

Peto poglavlje sadrži opis korišćene laboratorijske instalacije za stacionarno i dinamičko ispitivanje motora SUS. Posebna pažnja je posvećena konceptu upravljanja probnim stolom tokom dinamičkih ispitivanja. Opisana je osnovna arhitektura aplikacije, razvijene u programskom okruženju NI LabVIEW, koja ima funkciju

posrednika pri razmeni informacija između kontrolera motorske kočnice, kontrolera opterećenja motora i softvera AVL CAMEO namenjenog automatizaciji probnog stola za motore.

U okviru šestog poglavlja date su teorijske osnove dinamičkog eksperimenta sa promenom upravljačkog parametra po nagibnoj funkciju. Prikazan je način određivanja osnovne stacionarne aproksimacije na primeru linearnog sistema prvog reda. Razmotreni su različiti metodi pripreme sistema pre sprovođenja efektivnog dela dinamičkog testa, čime je napravljena razlika između stacionarne i dinamičke pripreme sistema. Na osnovu ovih ideja obavljeno je dinamičko ispitivanje motora metodom SDN na različitim brzinskim režimima i za različite nagibe, odnosno trajanja signala pobude. Takođe, analizirani su rezultati dinamičkog testa, za različite merne pozicije i konfiguracije eksperimenta.

Kvazistacionarne aproksimacije, odnosno korigovane srednje linije ovojnice ispitivanja metodom SDN u domenu globalnih upravljačkih veličina (broja obrtaja i opterećenja motora) prikazane se u sedmom poglavlju. Takođe, prikazane su relativne razlike SDN rezultata u odnosu na rezultate kvazistacionarnog ispitivanja motora. Merene veličine karakteriše različita dinamika procesa i mernog lanca, a s tim u vezi je dat komentar u smislu apsolutne tačnosti merenja.

U osmom poglavlju je prikazan način na koji mogu da se iskoriste rezultati ispitivanja SDN u smislu predznanja o ispitivanom objektu, a u cilju povećanja efikasnosti stacionarnog plana ispitivanja. Analiza gradijenata stacionarne aproksimacije ukazuje na oblasti radnog polja motora unutar koje bi dodatne tačke ispitivanja značajno smanjile grešku aproksimacija formiranih nad redukovanim brojem tačaka ispitivanja. Za realizaciju ovog dela rada, izvršena je statistička analiza rezultata matematičkih aproksimativnih modela na tačkama plana ispitivanja i radnom polju unutar granica formiranih modela. Identifikacija karakterističnih oblasti je prikazana za rezultate kvazistacionarnih i ispitivanja SDN različitog trajanja i različitog načina pripreme sistema. Time je potencijal metode SDN u ovom smislu interpretiran i prikazan za nekoliko karakterističnih merenih veličina.

Ustanovljeno je da interpretacija rezultata SDN, u smislu poboljšanja stacionarnog plana ispitivanja, ima smisla za merene veličine relativno brzog odziva. Stacionarne aproksimacije SDN merenja temperature izduvnih gasova pokazuju značajna odstupanja od stacionarnih rezultata, ali u okviru poglavlja devet je pokazano da upravo ovi rezultati najviše mogu da doprinesu ubrzanju procesa ispitivanja motora, odnosno uštedi vremena i povećanju efikasnosti. Postavkom matematičkog problema „otvorene putanje trgovačkog putnika”, za kriterijumsku funkciju dobijenu na

osnovu približnih vrednosti razlike temperatura izduvnih gasova na tačkama plana ispitivanja, formira se redosled izvršavanja stacionarnih radnih režima sa značajno skraćenim prosečnim vremenom stabilizacije. Za rešavanje ovog problema primenjen je odgovarajući genetski algoritam.

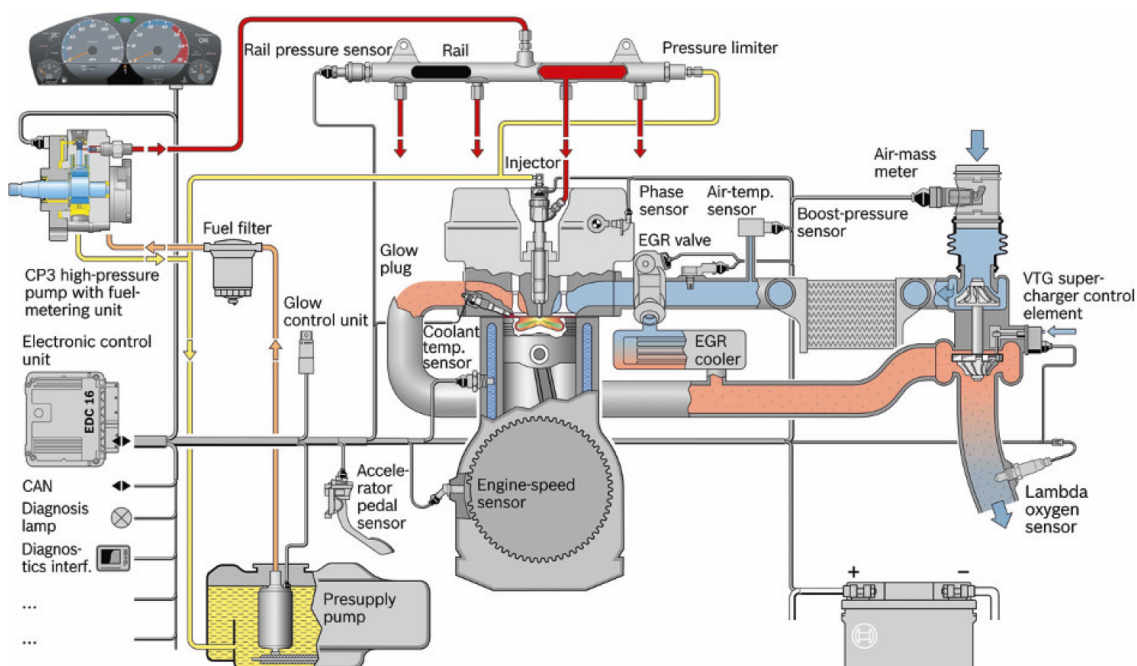
U poslednjem poglavlju su dati opšti zaključci ovog istraživanja i smernice za budući rad na temu dinamičkog ispitivanja motora SUS.

2. Kalibracija upravljačkih parametara motora SUS

Pooštavanje zakonskih propisa i sve strožiji zahtevi tržišta u pogledu performansi i komfora dovode do kontinualnog povećanja kompleksnosti pogonskog sistema vozila. Iako pogonski sistem može da se sastoji od različitih podsistema, centralna tačka u kojoj se ukrštaju sve informacije je elektronska upravljačka jedinica motora (EUJ). Savremena vozila su opremljena brojnim dodatnim sistemima kojima mogu da upravljaju zasebne upravljačke jedinice, ali određeni nivo komunikacije i razmene informacija između periferija i centralne EUJ motora mora da postoji, kako bi funkcionalnost i mogućnost sprovođenja servisne dijagnostike bili zadovoljeni. Upravo iz tog razloga, savremene EUJ broje i po nekoliko hiljada parametara na osnovu kojih će se formirati upravljanje nad pogonskim sistemom i drugim sistemima vozila.

Na slici 2.1 su prikazani elementi upravljačkog sistema savremenog dizel motora. Upravljačka jedinica posredstvom motorskih aktuatora, kao što su brizgač, EGR ventil ili rasteretni ventil turbine, vrši uticaj na odvijanje fizičkog procesa u samom motoru. Zbog nedostatka informacija o efektima dinamičkog ponašanja fizičkog sistema, koji su uslovljeni nelinearnostima ili poremećajima, EUJ motora posredstvom senzora dobija povratne informacije o trenutnom stanju sistema koji kontroliše. U tom smislu, savremeni motori su opremljeni velikim brojem senzora, kao što su senzori za merenje temperature, masenog protoka usisnog vazduha, prisustva kiseonika u izduvnom gasu, zatim različitim sensorima položaja i mnogim drugim.

Radi optimalnog podešavanja upravljačkih parametara na osnovu kojih će EUJ formirati upravljanje, sprovodi se takozvani proces kalibracije parametara upravljačke jedinice. Kao rezultat povećane kompleksnosti, nelinearnosti i multidimenzionalnosti objekta, kalibracija upravljačkih parametara EUJ je postala proces koji iziskuje najveće novčane i vremenske resurse u toku razvoja motora. Algoritam upravljačke jedinice se sastoji od brojnih funkcija [27] i odgovarajućih modela koji mogu biti različite kompleksnosti. Matematički modeli koji se koriste u ove svrhe dele se na



Slika 2.1.: Primer sistema dopremanja svežeg punjenja savremenog dizel-motora [14].

kompleksne modele fizičkog procesa datog podsistema i na pojednostavljene modele predstavljene u obliku upravljačkih mapa ili krivih.

U današnjoj praksi, grupacije proizvođača udružuju razvojne resurse pri projektovanju i proizvodnji određene motorske platforme. Čest je slučaj da određeni tip motora svoju primenu pronalazi u desetinama različitih aplikacija koje zavise od proizvođača, tipa vozila, dozvoljene emisije, nivoa performansi i adaptacije za određena tržišta [28]. U tom smislu, pored funkcionalne kompleksnosti, algoritam upravljačke jedinice motora mora da bude i dovoljno fleksibilan kako bi navedeni zahtevi mogli da se realizuju.

Samo primer projektovanja toka usisnog punjenja savremenog dizel-motora, uz primenu dvostepenog natpunjenja, niskopritisne i viskopritisne recirkulacije izduvnih gasova i regeneracije DPF (eng.: *Diesel Particulate Filter*) i NSC (eng.: *NO_x Storage Catalyst*) sistema, primer je izraženog višedimenzionalnog pristupa kod koga klasične metode upravljanja zasnovane na isključivo upravljačkim mapama ne mogu da daju zadovoljavajući rezultat. Sistem izmene radne materije koji poseduje navedene komponente je izrazito nelinearan, što uslovljava poznavanje trenutnih vrednosti i promene posmatranih vrednosti u datom trenutku kako bi sistem mogao pravilno da funkcioniše u dinamičkim uslovima eksploatacije. U tom slučaju, broj korekcionih mapa, koje lokalno linearizuju problem, postaje neracionalno veliki, što kalibracione

inženjere stavlja pred praktično nerešiv zadatak. Kombinovani sistemi upravljanja motorom SUS koji objedinjuju kalibracione mape i matematičke modele pojedinih motorskih sistema su deo razvoja vodeće kompanije u ovoj oblasti, ćerke firme giganta BOSCH, kompanije ETAS. Platforma koja revolucionarno povećava fleksibilnost algoritma upravljačke jedinice motora, nazvana *SCODE - System CO DEsign* [29], omogućava nezavisno matematičko modeliranje pojedinih komponenti motora, i jednoznačno izvršavanje takozvanih „modova rada” čijim se definisanjem značajno smanjuje broj potencijalnih kombinacija upravljačkih parametara koji se prosleđuju ka aktuatorima na samom motoru. Implementacija ovakve tehnologije značajno podiže kompleksnost algoritma upravljačke jedinice, ali kao rezultat kompromisa, olakšava proces kalibracije upravljačkih parametara.

Dinamički procesi koji se u motoru odvijaju nisu samo posledica delovanja motorskih aktuatora, već na proces utiču i brojni nepredvidivi poremećaji. Takođe, svako merenje fizičke veličine praćeno je mernim šumom što u dinamičkim uslovima upravljanja dodatno usložnjava problem. Prikupljanje informacija o karakteristikama motora i pogonskog sistema u celini se realizuje laboratorijskim ispitivanjem na motorskim kočnicama ili šasijskim dinamometrima. Zbog povećane kompleksnosti sistema, neophodan broj sati ispitivanja raste, a potreba za skupom laboratorijskom infrastrukturom, visokokvalifikovanim kadrom i specijalnim softverskim rešenjima pri ispitivanju motora iziskuje znatne finansijske resurse.

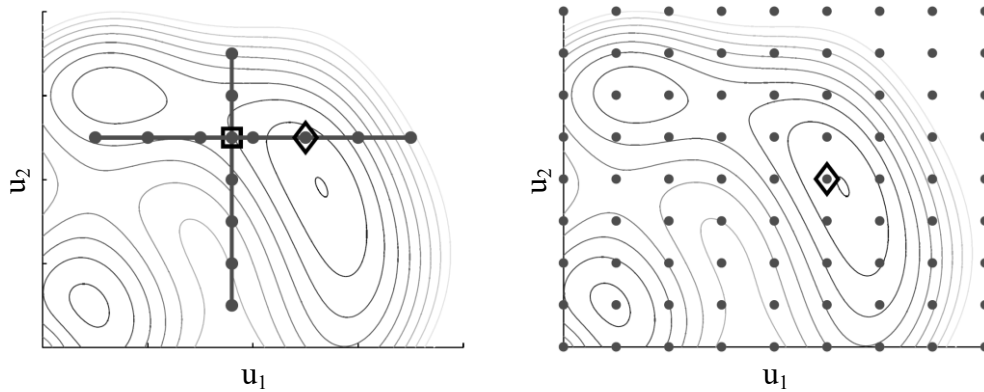
2.1. Osnovna kalibracija upravljačkih parametara

Najjednostavniji način podešavanja upravljačkih parametara motora SUS je sprovođenje kalibracije zasnovane na direktnoj analizi podataka dostupnih tokom ispitivanja, odnosno sprovođenje postupka pod nazivom „*Data Based Calibration*”. Ovakav tip kalibracije rezervisan je za pojedine konstante i funkcije jedne promenljive, tj. krive. U slučaju podešavanja parametara koji su funkcija više nezavisnih promenljivih, iskustvo i intuicija operatera, u načelu ne mogu da daju dovoljno dobar rezultat. Pri pokušaju podešavanja skupa krivih, tj. upravljačke mape, primenjuje se metoda pod nazivom *One-Factor-At-a-Time* (OFAT), tj. kalibracija jednog upravljačkog parametra pravovremeno. Na slici 2.2a prikazan je primer pronalaženja optimuma navedenom metodom, a postupak sastoji se od sledećeg:

- Počevši od proizvoljne vrednosti upravljačkog parametra u_1 , parametar u_2 se postavlja na diskretne vrednosti i prati se stacionarna vrednost izlazne vred-

nosti, tj. parametra na osnovu koga se sprovodi kalibracija. S obzirom na to da se samo jedan upravljački parametar menja tokom ispitivanja, proces optimizacije se svodi na jednodimenzioni;

- Kada je ustanovljena vrednost upravljačkog parametra u_2 za koji se dobijaju najbolji rezultati izlazne veličine, ta vrednost se zadržava i nastavlja se sa ispitivanjem uz diskretnu promenu upravljačkog parametra u_1 ;
- U iterativnom postupku sukcesivno se smenjuje pojedinačno variranje jednog upravljačkog parametra pravovremeno (u_1 ili u_2) i to po unapred definisanim diskretnim vrednostima sve dok se ne odredi, uslovno rečeno, najbolja vrednost kalibracionog parametra.



(a) Optimum pronađen OFAT metodom. (b) Globalni optimum za pun opseg diskretnih vrednosti ulaznih veličina.

Slika 2.2.: Poređenje položaja optimuma pri sprovođenju kalibracije pravovremenim variranjem jednog upravljačkog parametra i položaja globalnog optimuma [30].

Pozicija globalnog optimuma koji je dobijen sprovođenjem ispitivanja punog opsega (eng.: *Full Factorial*) za diskretne vrednosti oba nezavisna upravljačka parametra u_1 i u_2 , prikazana je na slici 2.2b. Primećuje se relativno malo odstupanje pozicije optimuma zahvaljujući dobro izabranim početnim vrednostima upravljačkog parametra u_1 pri sprovođenju metode OFAT, ali to ne mora uvek da bude slučaj. Kod višedimenzionog problema, može da bude više lokalnih optimuma, a metoda optimizacije po jednom parametru pravovremeno ne poseduje način za izbegavanje pronalaženja lokalnih optimuma. Iako je ova metoda relativno brza, iz navedenog razloga u praksi ne daje dobre rezultate i koristi se samo pri određivanju kalibracionih parametara čiji je uticaj na izlaznu vrednost relativno dobro poznat. Takođe, ova

metoda ima i druge nedostatke kao što su nemogućnost sprovođenja multikriterijumske optimizacije i problem donošenja odluke ukoliko ne postoji značajna promena izlazne veličine, odnosno veličine čija se vrednost prati pri sprovođenju optimizacije. Procena neophodnog vremena za ispitivanje je nepouzdana kao i krajnji kvalitet dobijenih rezultata.

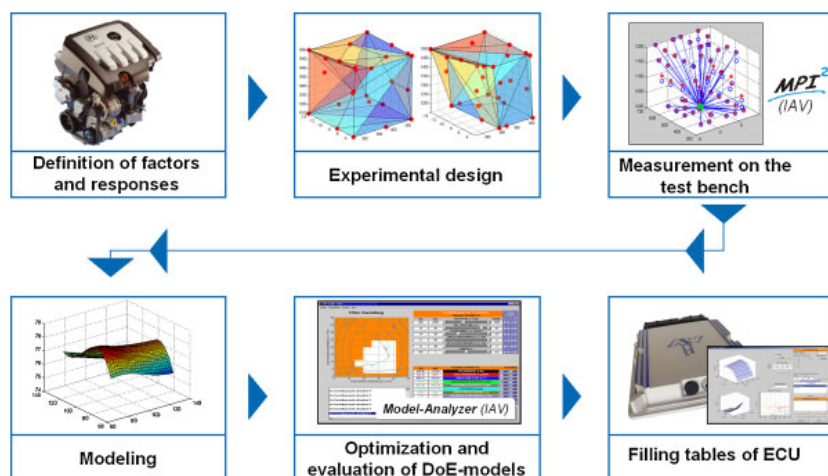
Metode kalibracije zasnovane na ispitivanju punog opsega nezavisnih upravljačkih parametara mogu da se koriste ukoliko je dimenzionalnost upravljanja ograničena na mali broj parametara, svega 2 do 3. Sa povećanjem dimenzionalnosti objekta, tj. sa povećanjem broja upravljačkih parametara koji zahtevaju kalibraciju, broj potencijalnih radnih režima se eksponencijalno povećava, što drastično otežava proces kalibracije. Ako se uzme u obzir da se unutar različitih oblasti globalnog radnog polja motora postavljaju različiti kriterijumi u smislu najpovoljnije kalibracije, ovakve metode se dodatno usložnjavaju. Tako na primer, unutar oblasti delimičnih opterećenja neophodno je postići maksimalnu ekonomičnost i najpovoljniji sastav izduvnih gasova, jer je unutar tih oblasti najveća zastupljenost radnih režima prilikom sprovođenja homologacionih voznih ciklusa. Na režimima maksimalnog opterećenja motora, maksimizacija efektivne snage i efektivnog obrtnog momenta je u fokusu, dok je na režimima u blizini praznog hoda neophodno postići što mirniji rad motora uz preciznu kontrolu prelaznih režima kako bi zahtev za komforom bio zadovoljen.

Ako se uzme u obzir različita dinamika motorskih aktuatora, različiti kriterijumi optimizacije uporedo sa zahtevom za što finijim (glatkim) mapama [31] i to na što širem radnom području upravljanja motorskim sistemima, zaključuje se da osnovne metode kalibracije nisu dovoljne. U tom smislu, razvijaju se napredne metodologije kalibracije upravljačkih parametara motora o kojima će biti više reči u nastavku.

2.2. Modelski zasnovana kalibracija upravljačkih parametara

Viši nivo organizacije laboratorijskog ispitivanja i kalibracije upravljačkih parametara motora SUS zasniva se na primeni modelski zasnovane kalibracije (MZK). Komercijalna softverska rešenja, kao što su *Matlab Model Based Calibration Toolbox (MBC)* [32], *ETAS ASCMO* [33], *AVL CAMEO* [34] i *FEV xCAL* [35] razvijana su sa ciljem sprovođenja optimalne kalibracije kompleksnih pogonskih sistema. Primenom ove metode, za formiranje aproksimacionih stacionarnih i dinamičkih matematičkih

modela, nisu potrebni rezultati punog opsega ispitivanja, već je dovoljno obezbediti rezultate redukovanog obima ispitivanja. Na slici 2.3 je prikazan redosled operacija prilikom sprovođenja kalibracije upravljačkih parametara primenom navedenog postupka.



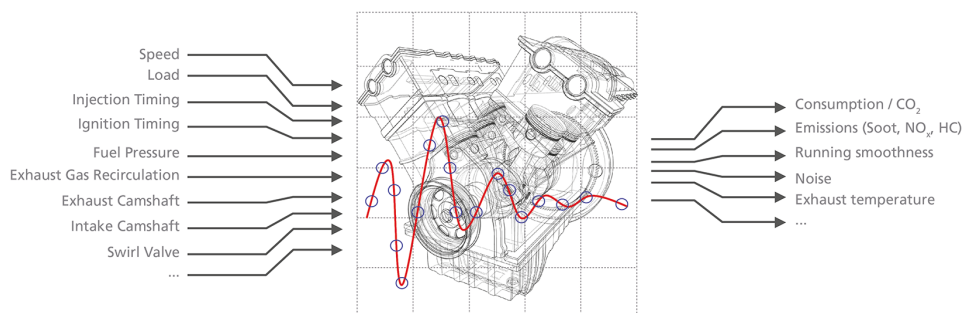
Slika 2.3.: Koncept modelski zasnovane kalibracije (*IAV Z-Process*) [36].

Prvi korak čini definisanje upravljačkih parametara i izlaznih promenljivih koje se prate u vidu odziva motora na dato upravljanje. Takođe, definiše se da li će modeli biti statički ili dinamički, empirijski ili delimično analitički. Sledeći korak čini formiranje plana ispitivanja prilikom koga se koriste metode zasnovane na konceptu dizajna eksperimenta (u daljem tekstu DE, eng.: *DoE - Design of Experiment*) [37]. Prikupljanje podataka eksperimentalnim putem ili primenom simulacionog softvera predstavlja naredni korak. Potom sledi matematičko modeliranje, tj. prevođenje domena ulaznih upravljačkih parametara u domen izlaznih veličina. Nakon sprovođenja odabira najkvalitetnijeg matematičkog modela sa aspekta statističkih parametara aproksimacije i provere (eng.: *model validation*), sledi proces numeričke višekriterijumske optimizacije. Poslednji blok operacija sastoji se od formiranja optimalnih upravljačkih mapa, prenošenje istih na mikrokontrolersku platformu upravljačke jedinice i provera formiranog upravljanja na fizičkom objektu.

U okviru ovog istraživanja korišćeno je programsko okruženje *Matlab*, sa odgovarajućim funkcijama MBC paketa, za formiranje matematičkih modela na osnovu rezultatata ispitivanja motora. Takođe, ovaj alat je korišćen za definisanje potencijalnog plana ispitivanja zasnovanog na DE konceptu o kome će biti više reči u poglavlju 8. U okviru MBC programskog paketa, postoji podela na tri osnovne strategije pri podešavanju matematičkih modela i generalnog plana ispitivanja: jednostepena, dvostepena i strategija pod nazivom tačka po tačka.

Jednostepeni (eng.: *One-Stage*) pristup podrazumeva da sve upravljačke veličine imaju isti prioritet pri sprovođenju eksperimenta, što ih svrstava u kategoriju globalnih upravljačkih veličina. Dobijeni matematički modeli daju zavisnost izlaznih veličina u funkciji svih upravljačkih veličina, a grafičkom interpretacijom ovakvih modela stižu se informacije o obliku promene izlazne veličine u globalnom prostoru. Pri sprovođenju inicijalnog ispitivanja motora, kada ne postoji visok nivo znanja o samom objektu, globalni matematički modeli mogu da se iskoriste za određivanje približne vrednosti dozvoljenih opsega upravljačkih veličina. Primeri ulaznih i izlaznih veličina koje se analiziraju pri sprovođenju ovakvog postupka date su na slici 2.4.

Metode DE se koriste za formiranje plana kvazistacionarnih ispitivanja prilikom čijeg izvođenja se sukcesivno menjaju radni režimi okarakterisani određenom kombinacijom upravljačkih parametara. Prelazak sa jednog radnog režima na sledeći vrše se simultanom promenom upravljačkih parametara, ukoliko to infrastruktura ili granični uslovi dozvoljavaju. Primeri globalnih upravljačkih veličina su broj obrtaja motora, efektivni obrtni moment, srednji indicirani pritisak, pozicija varijabilne šeme razvoda, stepen natpunjenja, sastav smeše i tako dalje. U ovom radu primenjena je jednostepena strategija prilikom generisanja globalnih matematičkih modela izlaznih veličina ispitivanog motora za stacionarna ispitivanja na određenom opsegu broja obrtaja i efektivnog obrtnog momenta motora. Takođe, ista strategija je upotrebljena prilikom obrade rezultata dinamičkih ispitivanja, tj. formiranja stacionarne aproksimacije.



Slika 2.4.: Primeri ulaznih i izlaznih veličine koje se analiziraju prilikom sprovođenja modelski zasnovane kalibracije [38].

Dvostepena (eng.: *Two-Stage*) strategija podrazumeva podelu upravljačkih parametara u dve nezavisne grupe, na lokalne i globalne. Ovakav pristup formiranju matematičkih modela i sprovođenju ispitivanja je neophodan u slučajevima kada je potrebno da se jedan ili više lokalnih parametara variraju, dok se ostale (globalne)

veliĉine odrŹavaju na konstantnom nivou. Kombinacije globalnih upravljaĉkih parametara, u ovom sluĉaju, mogu da se posmatraju na isti naĉin kao pri sprovođenju jednostepene strategije ispitivanja, s tim Źto će formirani modeli izlazne veliĉine biti funkcije i lokalnih nezavisnih promenljivih veliĉina [39, 40]. Primer lokalne promenljive moŹe da bude ugao predpaljenja, poĉetak ubrizgavanja, sastav smeŹe, pritisak ubrizgavanja itd. Ovako formirani matematiĉki modeli mogu da se koriste za potrebe odreĉivanja optimalnih kalibracionih mapa, projektovanja upravljanja i testiranja softvera i hardvera EUJ [40]. Navedene lokalne promenljive spadaju u kategoriju upravljaĉkih veliĉina za koje je neophodna upravljaĉka jedinica koja omogućava podeŹavanje upravljaĉkih parametara putem lokalnog interfejsa ili putem udaljenog pristupa.

Strategija taĉka po taĉka (eng.: *Point-by-Point*) koristi se za potrebe optimizacije radnih reŹima kada dvostepeni pristup modeliranja i optimizacije ne moŹe da dâ zadovoljavajući rezultat. Kod ove metode, matematiĉki modeli nisu funkcije globalnih upravljaĉkih parametara u celosti, već se diskretne vrednosti globalnih upravljaĉkih veliĉina odreĉuju kao rezultat klasterizacije zastupljenosti radnih reŹima pri realizaciji dinamiĉkog voznog ciklusa za koji se sprovodi optimizacija upravljanja. Na ovaj naĉin se znaĉajno redukuje kompleksnost globalnog modela, ali se veća paŹnja posvećuje preciznoj optimizaciji većeg broja lokalnih parametara. Osnovni nedostatak ovakve metode optimizacije ogleda se u gruboj proceni udela zastupljenosti stacionarnih radnih reŹima, dok se kumulativni rezultati optimizacije koji vaŹe za dati dinamiĉki vozni ciklus odreĉuju teŹinskim odnosima [41]. Takođe, neophodna je naknadna kalibracija dinamiĉkog upravljanja, jer sprovedena optimizacija vaŹi samo za stacionarne uslove rada.

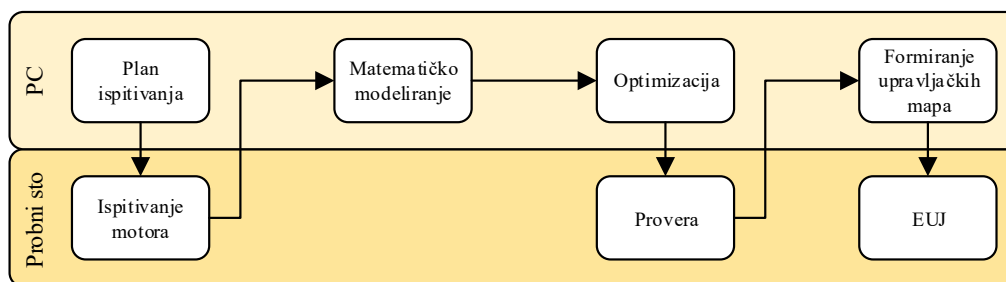
2.2.1. Posredna i direktna modelski zasnovana kalibracija

Modelska zasnovana kalibracija donosi odreĉene povoljnosti u odnosu na konvencionalne metode odreĉivanja optimalnog upravljanja, a te povoljnosti mogu da se kategorišu na sledeći naĉin:

- Ukoliko postoji dovoljno kvalitetan matematiĉki model koji opisuje zavisnost izlaznih motorskih veliĉina u funkciji globalnih i lokalnih upravljaĉkih parametara, onda takav model moŹe da se iskoristi za odreĉivanje optimalnog upravljanja. Većina procedura vezana za optimizaciju moŹe da se realizuje van probnog stola, Źto doprinosi smanjenju cene procesa kalibracije uz povećanje modularnosti konaĉnih rezultata;

- Višedimenzionalnost problema i paralelno delovanje većine motorskih aktuatora uslovljavaju definisanje ograničenja oblasti njihovog delovanja, što se jednostavno primenjuje na domenu matematičkih modela. Drugim rečima, primena određenog predznanja o objektu koji se ispituje se jednostavno implementira tokom kalibracionog procesa;
- Prilikom formiranja matematičkih modela primenjuju se tehnike odabira radnih režima koji u najvećoj meri mogu da doprinesu kvalitetnijoj aproksimaciji posmatrane fizičke veličine. U poglavlju 8.2, biće prikazana jedna od metoda za povoljniji odabir radnih režima osnovnog plana ispitivanja;
- Interpretacija statističkih parametara matematičkih modela daje uvid u to koliko model dobro, ili loše, opisuje posmatani promenu. Takođe, moguće je odrediti pojedinačni uticaj svakog radnog režima na oblik konačnog modela. Na taj način se dolazi do informacije da li je model suviše jednostavan ili suviše komplikovan;
- Grafička interpretacija formiranih matematičkih modela omogućava jednostavan uvid i analizu stacionarnih procesa u motoru. Sprovedenjem provere modela, dolazi se do informacije u kojoj meri posmatrani model generalizuje proces, što uz grafički prikaz olakšava postupak odabira najkvalitetnijeg matematičkog modela.

Posrednu MZK karakterišu razdvojeni procesi prikupljanja podataka na probnom stolu i formiranje matematičkih modela. Na slici 2.5 su prikazane osnovne celine jednog takvog procesa. Na početku se određuje plan ispitivanja, koji je uglavnom zasnovan na različitim konceptima dizajna eksperimenta, a čijim se sprovođenjem prikupljaju podaci neophodni za modeliranje koje sledi. Nad ovako formiranim matematičkim modelima sprovodi se postupak numeričke optimizacije i formiraju se, uslovno rečeno, optimalne upravljačke mape. Potom se obavlja postupak provere formiranog upravljanja ponovnim ispitivanjem na probnom stolu i ukoliko se dobiju očekivani rezultati, formirane upravljačke mape se prihvataju i trajno smeštaju u memorijski prostor EUJ.

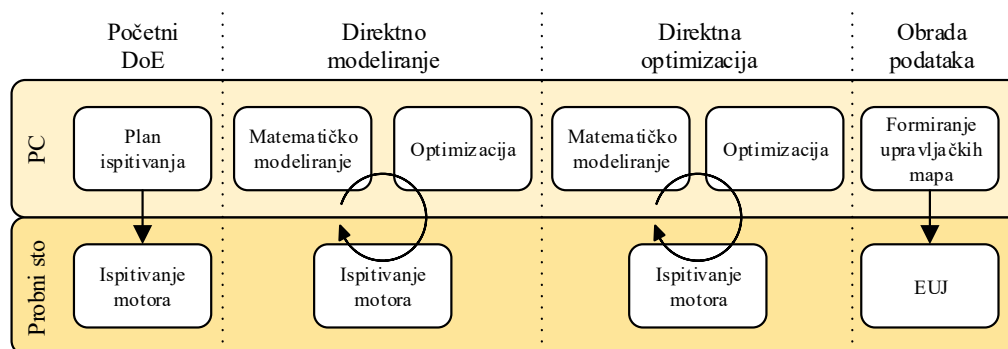


Slika 2.5.: Šematski prikaz posredne modelski zasnovane kalibracije upravljačkih parametara motora SUS.

Najveći nedostatak posredne MZK (eng.: *Offline Model Based Calibration*) je taj što se kvalitet formiranog matematičkog modela ne proverava tokom procesa ispitivanja motora. Ukoliko se desi da je kvalitet matematičkog modela loš, usled premalog broja ispitanih režima ili ukoliko se među podacima nalazi suviše veliki broj netipičnih vrednosti (eng.: *Outliers*), rezultati optimizacije će biti pogrešni, što će biti potvrđeno tokom naknadne provere formiranog upravljanja na samom motoru.

Navedeni nedostaci mogu da se prevaziđu ukoliko se primeni metoda direktne MZK (eng.: *Online Model Based Calibration*) koju karakteriše sukcesivno snimanje podataka, matematičko modeliranje i optimizacija upravljanja prema unapred definisanim kriterijumima [42]. Na slici 2.6 su šematski prikazane faze ovakvog procesa kalibracije. S obzirom na to da su proces modeliranja i merenja na probnom stolu povezani, sistem može da bude automatizovan posredstvom povratne informacije o kvalitetu formiranog matematičkog modela. Iako kompleksniji, ovakav pristup ima određene prednosti u poređenju sa posrednom MZK, a to su:

- Povratna informacija o kvalitetu modela na osnovu broja ispitanih radnih režima. Ukoliko se daljim ispitivanjem ne postiže kvalitetniji matematički model, ispitivanje se prekida i nastavlja se sledeći korak. Naravno, ovo važi uz pretpostavku da je kategorija i kompleksnost modela unapred definisana.
- Na osnovu formiranih matematičkih modela mogu da se identifikuju oblasti radnog polja motora unutar kojih bi bilo poželjno dodati tačke naknadnog ispitivanja kako bi se formirao kvalitetniji model u sledećoj iteraciji.



Slika 2.6.: Šematski prikaz direktne modelski zasnovane kalibracije upravljačkih parametara motora SUS.

Na početku procesa se definiše inicijalni plan ispitivanja, potom sledi iterativno formiranje matematičkih modela i njihovih poboljšavanja na osnovu rezultata dodatnih merenja. Kada je formiran dovoljno kvalitetan model pristupa se numeričkoj optimizaciji upravljačkih mapa, koje se nakon uspešne provere koriste na EUJ. Prednost ovakvog načina formiranja optimalnih upravljačkih mapa ogleda se u brznoj analizi modeliranih izlaznih veličina na domenu globalnih i lokalnih upravljačkih veličina uz mogućnost postavljanja granica u smislu dozvoljenih vrednosti određenih parametara unutar željenih oblasti radnog prostora motora i maksimalno dozvoljene razlike susednih vrednosti unutar klibracione mape. Osnovni nedostatak posredne i direktne MZK je formiranje početnog plana ispitivanja sa ograničenom količinom predznanja o ispitivanom objektu. Takođe, metoda MZK ne daje dobre rezultate ukoliko se modeli izlaznih veličina posmatraju na čitavom radnom području, već se preporučuje neka vrsta podele radnog polja (na primer za režime sa pozitivnim i režime sa negativnim efektivnim obrtnim momentom). U narednim poglavljima biće prikazana procedura i opisani rezultati dinamičkog ispitivanja motora koji mogu da doprinesu u ovom smislu, odnosno povećaju nivo predznanja o objektu koji se ispituje pre formiranja inicijalnog plana ispitivanja.

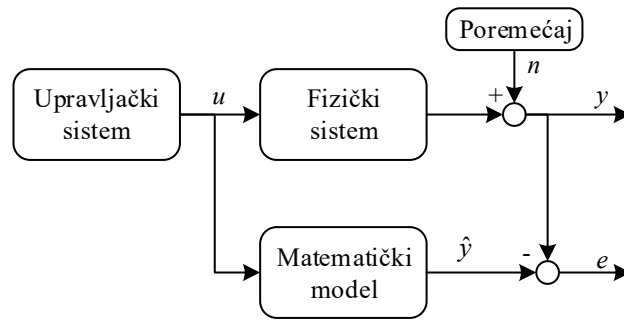
3. Matematički modeli u procesu kalibracije

Matematički modeli zasnovani na analitičkim jednačinama koje opisuju dati proces, sa inženjerske tačke gledišta imaju najveću vrednost, jer ovakve modele odlikuje parametrizacija koja je u direktnoj vezi sa razumevanjem fizikalnosti procesa. Nažalost, određeni procesi još uvek ne mogu jednostavno da se opišu analitičkim funkcijama ili je neophodno suviše vremena kako bi se tačno parametrizovao dati matematički model. Takođe, za precizne matematičke modele, definisane na ovaj način, rešavanje sistema jednačina zahteva izuzetne računarske resurse. Iz tog razloga se pri sprovođenju procesa modelski zasnovane kalibracije upravljačkih parametara motora SUS koriste takozvani statistički aproksimativni modeli koji ne zahtevaju potpuno poznavanje fizikalnosti procesa kojeg opisuju, a čijom se parametrizacijom omogućava preslikavanje domena upravljačkih veličina na domen odziva, odnosno izlaznih veličina.

Matematički modeli zasnovani na analitičkim funkcijama se u literaturi nazivaju modeli bele kutije (eng.: *white-box*), dok se matematički modeli formirani isključivo na osnovu eksperimentalnih podataka nazivaju modeli crne kutije (eng.: *black-box*). Kategoriju matematičkih modela sive kutije (eng.: *gray-box*) odlikuje upotreba podataka dobijenih laboratorijskim ispitivanjem u kombinaciji sa jednostavnim analitičkim relacijama. Ovakvi modeli se u praksi često koriste, posebno pri modeliranju veličina koje se posredno izračunavaju i pri definisanju graničnih vrednosti upravljačkih veličina.

Na slici 3.1 prikazan je odnos između fizičkog procesa $y(t)$ koji se odvija kao posledica upravljanja $u(t)$ i izlazne vrednosti matematičkog modela $\hat{y}(t)$ koji treba što vernije da opiše stvarni fizički proces kako bi greška $e(t)$ bila što manja:

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \tag{3.1}$$



Slika 3.1.: Šematski prikaz određivanja greške matematičkog modela.

Kao što je prikazano na slici 2.4, pri formiranju upravljanja motorom SUS, potrebno je izvršiti kalibraciju velikog broja upravljačkih parametara na osnovu veličina koje su posledica odvijanja radnog ciklusa. U opštem slučaju statički matematički modeli preslikavaju p ulaznih veličina $u_i, i = [1, p]$, predstavljenih pomoću vektora:

$$\underline{u} = [u_1 \ u_2 \dots u_p]^T \quad (3.2)$$

u r izlaznih veličina $y_j, j = [1, r]$, koji mogu da se opišu vektorom:

$$\underline{y} = [y_1 \ y_2 \dots y_r]^T \quad (3.3)$$

Takav matematički model predstavlja sistem sa višestrukim paralelnim ulazima i izlazima, odnosno u literaturi poznatiji kao *MIMO* sistem (eng.: *Multiple-Input Multiple-Output*). Iz praktičnih razloga ovakvi modeli se raščlanjuju na r različitih modela koje karakteriše p ulaznih veličina i jedna izlazna veličina [43]. Takvi, pojednostavljeni modeli se nazivaju *MISO* (eng.: *Multiple-Input Single-Output*). Matematičke modele ovog tipa karakteriše sledeće:

- Svaki pojedinačni matematički model *MISO* je jednostavniji od sveobuhvatnog modela *MIMO* i iz tog razloga može bolje da se razume i primeni u praksi;
- Proces provere modela je jednostavniji;
- Zahtevana tačnost svakog modela *MISO* može pojedinačno da se konfiguriše;
- Različita arhitektura i tehnike optimizacije mogu da se primene nad svakim modelom *MISO* pojedinačno, što proces matematičkog modeliranja i kalibracije čini fleksibilnijim.

Pri analizi rezultata motorskih ispitivanja prikazanih u ovom radu, formiraće se modeli MISO, kao što je na primer model koji opisuje promenu temperature izduvnih gasova (jedna izlazna veličina) u funkciji broja obrtaja i opterećenja motora (višestruke ulazne veličine).

Ukoliko se objekat i model posmatraju u stacionarnim uslovima, promene u funkciji vremena t su jednake nuli, tj. važe relacije:

$$\frac{du(t)}{dt} = 0, \quad \frac{d\hat{y}(t)}{dt} = 0. \quad (3.4)$$

U opštem slučaju, izlaz modela MISO može da se formuliše kao:

$$\hat{y} = f(\underline{u}) \quad (3.5)$$

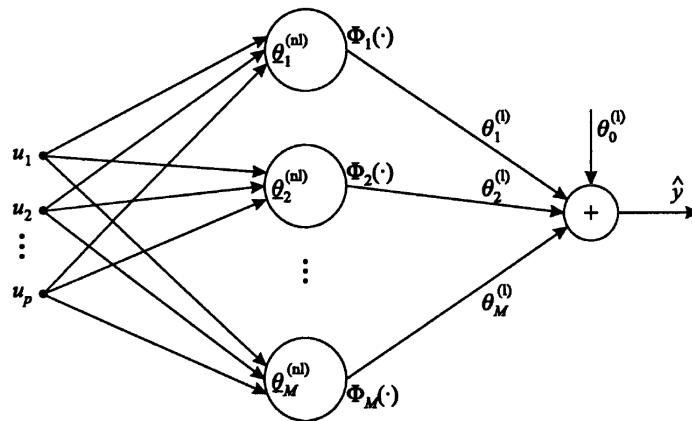
Svaka funkcionalna zavisnost $f(\underline{u})$, koja opisuje stacionarni proces, može da se predstavi kao suma M težinski ponderisanih osnovnih funkcija Φ_i :

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^M \theta_i^{(l)} \Phi_i(\underline{u}, \underline{\theta}_i^{(nl)}) \quad (3.6)$$

gde je $\theta_i^{(l)}$ linearni težinski koeficijent. Za potrebe aproksimacije nelinearne funkcije $f(\underline{u})$, osnovna funkcija Φ_i takođe mora biti nelinearna što je uslovljeno nelinearnim parametrima $\theta_i^{(nl)}$. Osnovne funkcije Φ_i ne moraju biti istog tipa za sve sabirke jednačine 3.6, a ukoliko osnovne funkcije jesu istog tipa, onda tako formulisan matematički model pripada klasi matematičkih modela poznatih pod nazivom *veštačka neuronska mreža*. Ovako formulisani matematički modeli mogu da poseduju članove koji obezbeđuju linearan otklon tražene funkcije nezavisno od vrednosti \underline{u} , što se izražava jednačinom:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^M \theta_i^{(l)} \Phi_i(\underline{u}, \underline{\theta}_i^{(nl)}), \quad \Phi_0(\underline{u}, \underline{\theta}_0^{(nl)}) = 1 \quad (3.7)$$

Element mreže koji obezbeđuje linearni otklon bilo kog čvora mreže se u literaturi naziva *bias*. Na slici 3.2 je prikazana VNM koja odgovara modelu opisanom jednačinom 3.7 i kod koje izlazna vrednost, pored zavisnosti $\hat{y}(\underline{u})$, zavisi od pravilno izabranih koeficijenata $\theta_i^{(l)}$ i $\theta_i^{(nl)}$ za $i = [0, M]$.



Slika 3.2.: Veštačka neuronska mreža sačinjena od nelinearnih osnovnih funkcija i odgovarajućih linearnih težinskih faktora [43].

Izbor osnovne funkcije Φ_i u znatnoj meri utiče na mogućnosti aproksimacije datog matematičkog modela. U tom smislu, osnovne funkcije se dele na globalne i lokalne osnovne funkcije. Promenljivo globalno ponašanje modela, izraženo kao data nelinearnost u funkciji ulaznih veličina, može da se postigne ukoliko linearni parametri $\theta_i^{(l)}$, koji množe nelinearnu funkciju Φ_i , mogu znatno da promene izlaznu vrednost posmatranog modela na globalnom nivou. Striktno globalne osnovne funkcije karakteriše $\frac{d\Phi_i}{du} \neq const$ na širokom opsegu upravljačkog parametra, dok obične globalne osnovne funkcije mogu da opišu određenu nelinearnost samo u uskim oblastima ulaznog parametra za koji važi promenljiv $\frac{d\Phi_i}{du}$, što je uslovljeno izborom parametra $\theta_i^{(l)}$. Lokalne osnovne funkcije se, takođe, dele na strikne i obične lokalne funkcije, a karakteriše ih $\Phi_i = 0$, za oblasti izvan njihovog lokalnog delovanja. Lokalne osnovne funkcije se u literaturi još nazivaju i *aktivacione funkcije*. Više detalja o osnovnim funkcijama i aktivacionim funkcijama, kao i o njihovim mogućnostima da promene izlazne vrednosti modela na globalnom, odnosno lokalnom nivou, može se pronaći u literaturi [44, 43].

3.1. Linearni matematički modeli

Matematički model, iskazan opštom jednačinom 3.7, će biti linearan ukoliko izlazna vrednost modela zavisi isključivo od parametrizacije linearnih koeficijenata $\theta_i^{(l)}$. Za linearne modele se podrazumeva da su osnovne funkcije, koje mogu biti linearne ili nelinearne, prethodno parametrizovane i usvojene.

Uzmimo u razmatranje polinomski model. Ova kategorija modela se često koristi u inženjerskoj praksi. Svaki član polinomskog modela može da se predstavi kao proizvod odgovarajuće osnovne funkcije i koeficijenta:

$$\underline{\theta}^{(l)} = [c_i] \mid i = [0, M] \quad (3.8)$$

U opštem slučaju, osnovne funkcije nisu i ne moraju da budu identične za sve članove, te stoga imamo:

$$\Phi_i(\underline{u}) = [u^i] \mid i = [0, M] \quad (3.9)$$

odnosno $1, u, u^2, u^3$, itd., gde M definiše red polinoma. Postavka modela, u ovom slučaju glasi:

$$\hat{y} = c_0 + c_1 u + c_2 u^2 + \dots + c_M u^M = \sum_{i=1}^M c_i u^i = \sum_{i=1}^M \underline{\theta}^{(l)} \Phi_i(\underline{u}) \quad (3.10)$$

Za ukupno $k = [1, N] \mid N > M$ posmatranja fizičkog procesa za koji se formira regresioni model, definiše se odstupanje stvarne od modelirane izlazne veličine kao:

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (3.11)$$

Uzevši u obzir N posmatranja datog stacionarnog procesa, moguće je formiranje regresione matrice $\underline{\mathbf{X}}$ i vektora linearnih koeficijenata $\underline{\theta}^{(l)}$ prema:

$$\underline{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 1 & \Phi_1(\underline{u}(1)) & \Phi_2(\underline{u}(1)) & \cdots & \Phi_M(\underline{u}(1)) \\ 1 & \Phi_1(\underline{u}(2)) & \Phi_2(\underline{u}(2)) & \cdots & \Phi_M(\underline{u}(2)) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \Phi_1(\underline{u}(N)) & \Phi_2(\underline{u}(N)) & \cdots & \Phi_M(\underline{u}(N)) \end{bmatrix}, \underline{\theta}^{(l)} = \begin{bmatrix} \theta_0^{(l)} \\ \theta_1^{(l)} \\ \theta_2^{(l)} \\ \vdots \\ \theta_M^{(l)} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Polinomski modeli imaju široku primenu zahvaljujući veoma efikasnim metodama linearne optimizacije, kao što je na primer, metoda najmanjih kvadrata [45], koja podrazumeva određivanje koeficijenata modela prema uslovu minimizacije jednačine 3.11 rešavanjem sistema jednačina:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \theta_0^{(l)}} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k(\underline{\theta}^{(l)}))^2 &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial \theta_1^{(l)}} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k(\underline{\theta}^{(l)}))^2 &= 0 \\
&\vdots \\
\frac{\partial}{\partial \theta_M^{(l)}} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k(\underline{\theta}^{(l)}))^2 &= 0
\end{aligned} \tag{3.13}$$

odnosno pronalaženja minimuma odstupanja e određivanjem navedenih parcijalnih izvoda po svakom nezavisnom koeficijentu $\theta_i^{(l)}$. U literaturi se ovakav tip metode optimizacije naziva minimizacija težinske funkcije gradijentnom metodom jer podrazumeva analizu gradijenta, odnosno prvog izvoda sa leve strane znaka jednakosti prethodnog sistema jednačina. Prethodni primer se odnosio na stacionarni proces preslikavanja jednodimenzionog domena ulazne veličine u na jednodimenzioni domen izlaznih veličina \hat{y} . U slučaju veće dimenzionalnosti ulaza (MISO sistem), metode određivanja koeficijenata polinomskih modela su složenije, ali se zasnivaju na istom principu.

Prilikom aproksimacije linearnim modelima, neophodno je odrediti red modela u svakom od pravaca p -dimenzionog prostora ulaznih veličina i neophodno je izvršiti optimizaciju nelinearnosti osnovnih funkcija. Takođe, neophodno je odrediti da li članovi polinomskeg modela treba da imaju osnovne nelinearne funkcije oblika $u^i, i \in \mathbb{Z}$, ili je možda bolje da eksponenti pripadaju dugačijem skupu brojeva, kao što su na primer racionalni $u^i, i \in \mathbb{Q}$ ili iracionalni brojevi $u^i, i \in \mathbb{R} - \mathbb{Q}$.

Nedostatak polinomskih modela je taj što je interpretacija dobijnog modela neintuitivna i ne postoji mogućnost primene prethodno stečenog znanja o modeliranom objektu prilikom parametrizacije modela. Drugi negativan aspekt polinomskih modela jeste činjenica da sa povećanjem broja dimenzija računskog prostora, eksponencijalno raste broj koeficijenata modela, tako da se ne preporučuje njihovo korišćenje pri interpretaciji sistema koji imaju veći broj nezavisnih ulaza. Optimizacija članova polinomskih modela je veoma važna jer se odbacivanjem članova koji nemaju značajan uticaj na krajnji rezultat redukuje kompleksnost modela, a smanjena kompleksnost pozitivno utiče na rešavanje problema preteranog prilagođenja modela, odnosno jurenja podataka (eng.: *overfitting*).

Za optimizaciju članova polinomskih modela se koristi, metoda višestruke postepene regresije (eng.: *Stepwise regression*) [46, 47] koja nastoji da minimizuje sumu kvadrata greške aproksimacije (eng.: *PRESS - Predicted Residual Error Sum of Squ-*

ares), odnosno da poveća mogućnost generalizacije modela. U opštem smislu, parametar *PRESS* se određuje tako što se svaki od pojedinačnih prediktora (ulaza) $u_k, k = 1, \dots, N$ iterativno odbacuje i formira se novi model na osnovu $N - 1$ tačaka. Na osnovu izlazne vrednosti $\hat{y}_{k,-k}$ tako dobijenog modela određuje se ovaj parametar kao:

$$PRESS = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_{k,-k})^2 \quad (3.14)$$

U literaturi se još označava sa P^2 i predstavlja meru krosvalidacije modela za usku oblast parametra koji nedostaje pri modeliranju. Manje vrednosti ukazuju da model nije previše osetljiv na bilo koju pojedinačnu tačku iz domena raspoloživih podataka za aproksimaciju.

Interpolacioni splajn (eng.: *spline*) takođe pripada kategoriji linearnih modela. Za razliku od običnih polinomske aproksimacije, splajn interpolacija je sačinjena od većeg broja polinomske funkcije nižeg reda koje važe na ograničenom domenu nezavisne veličine. Pri određivanju koeficijenata polinomske podmodela koristi se set jednačina 3.13 i dopuna koja uslovljava izjednačavanje gradijenta u tačkama prelaska sa jednog podmodela na sledeći. Tačke prelaza se nazivaju čvorovi splajn funkcije, a za datu jednodimenzionu promenu definisanu parovima u_k, y_k za $k = [1, N]$, čvorova može biti najviše $N - 2$.

Sledeću kategoriju čine aproksimativne splajn funkcije (eng.: *smoothing spline*), a metod za određivanje koeficijenata modela je opisao *De Bor (de Boor)* [48]. U tom slučaju je ukupan broj čvorova manji od $N - 2$, a konačna aproksimacija ne prolazi kroz sve tečke posmatrane populacije u_k, y_k [49]. Veza između robusnije aproksimacije, koja u ekstremnom slučaju identična linearnom regresionom modelu prvog reda, i fleksibilne aproksimacije, koja može da sadrži sve tačke date populacije, je određena parametrom p u okviru sledeće jednačine čijom se minimizacijom određuju koeficijenti podmodela aproksimativnog splajna:

$$\min \left(p \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}(u_k))^2 + (1 - p) \int_{u_1}^{u_N} \left(\frac{d^2 \hat{y}}{du^2} \right) du \right) \quad (3.15)$$

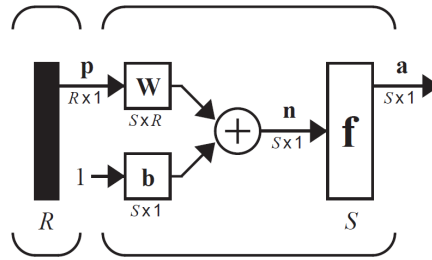
Aproksimacije višedimenzionih procesa mogu da se realizuju upotrebom hibridnih splajn modela koje karakteriše splajn aproksimacija u pravcu jedne nezavisne promenljive, dok se u ostalim pravcima koriste polinomske aproksimacije.

Prilikom formiranja aproksimativnih modela motorskih parametara, na domenu globalnih upravljačkih veličina, ne preporučuje se upotreba polinomskih, splajn i hibridnih splajn aproksimacija. Ovakvi modeli su rezervisani za aproksimacije stacionarnih odziva sistema na nivou lokalne upravljačke veličine (poglavlje 2.2). Ilustracije radi, hibridni splajn sa jednim čvorom bi bio idealan za modeliranje zavisnosti efektivnog obrtnog momenta u funkciji ugla pretpaljenja na datom brzinskom režimu i pri fiksnom parametru opterećenja motora [50].

3.2. Nelinearni matematički modeli

Jednačina 3.7, u opštem smislu, definiše matematički model koji se sastoji od više jednostavnijih podmodela. Ukoliko izlazna vrednost podmodela, na bilo koji način zavisi od nelinearnog koeficijenta osnovne funkcije $\Phi_i(\underline{u}, \underline{\theta}_i^{(nl)})$, model će biti nelinearan. Takođe, nelinearnost modela se ogleda i u uzajamnoj zavisnosti linearnih koeficijenata $\underline{\theta}_i^{(l)}$ posmatranih podmodela. Kao što je napomenuto, matematički modeli formirani na osnovu težinski ponderisanih nelinearnih podmodela istog tipa se nazivaju veštačke neuronske mreže (VNM). S obzirom na nelinearnost aktivacione funkcije svakog podmodela (neurona) i uzajamne zavisnosti koeficijenta višeslojne VNM, ovakvi matematički modeli pripadaju kategoriji nelinearnih matematičkih modela [43].

Koncept neuronskih mreža je zasnovan na paralelnom izračunavanju velikog broja relativno jednostavnih jednačina u cilju opisivanja složenih nelinearnih zavisnosti. Osnovna ideja VNM je preuzeta po ugledu na biološke sisteme, odnosno princip funkcionisanja mozga i veza između nervnih ćelija. Osnovni element VNM je perceptron, koji na ulaznoj strani prima informacije od ostalih elemenata mreže i na osnovu težinskih koeficijenata, koji linearno transformišu ulazne veličine, vrši sumiranje svih ulaznih veličina. Rezultat sumiranja se prosleđuje aktivacionoj funkciji, koja vrši nelinearnu (ili linearnu) transformaciju i time formira izlaznu vrednost datog perceptrona. Ukoliko su perceptroni postavljeni u paralelnu vezu, kao na slici 3.2, takva struktura se naziva sloj mreže. Pojednostavljena šema jednog sloja mreže koja se sastoji od S perceptrona data je na slici 3.3.



Slika 3.3.: Šematski prikaz perceptrona jednog sloja VNM [44].

Za R ulaza datog sloja, koji se prosleđuju svakom od S perceptrona, portebno je odrediti matricu težinskih koeficijenata $\mathbf{W}_{S \times R}$. Svaki neuron, odnosno pojedinačni perceptron, može da poseduje član težinske sume koji predstavlja linearni otklon (*bias* $\underline{b}_{S \times 1}$), nezavisno od vrednosti ulaznih veličina $\underline{p}_{R \times 1}$. Na taj način se povećava fleksibilnost pojedinačnih perceptrona i olakšava se proces učenja, odnosno pronalaženja nepoznatih koeficijenata sadržanih unutar \mathbf{W} i \underline{b} . Nakon određivanja težinske sume, podaci se prosleđuju aktivacionoj funkciji f kako bi se formirale izlazne vrednosti \underline{a} za svaki od neurona datog sloja VNM. U opštem obliku, izlazna vrednost perceptrona, može da se iskaže u obliku:

$$\underline{a} = f(\mathbf{W}\underline{p} + \underline{b}) \quad (3.16)$$

Za određivanje koeficijenata jednoslojne perceptronske mreže, koristi se takozvano *Hebovo* pravilo (eng.: *Hebb's Rule*) [44], a koje je zasnovano na ideji pojačanja veza (sinapsi) date mreže za grupu unapred definisanih ulazno-izlaznih parova podataka:

$$\{\underline{p}_1, \underline{t}_1\}, \{\underline{p}_2, \underline{t}_2\}, \{\underline{p}_q, \underline{t}_q\}, \dots, \{\underline{p}_Q, \underline{t}_Q\} \quad (3.17)$$

S obzirom da se u iterativnom procesu proverava odstupanje trenutne i željene vrednosti izlazne veličine modela, ovakav pristup pri određivanju vrednosti težinskih koeficijenata modela se naziva nadgledano učenje (eng.: *Supervised Hebbian Learning*). Matematička interpretacija Hebovog treniranja, može da se iskaže kao:

$$w_{ij}^{novo} = w_{ij}^{staro} + \alpha t_{iq} p_{jq}, i = [1, S], j = [1, R] \quad (3.18)$$

gde je: t_{iq} i -ti element q -tog željenog vektora izlaza \underline{t}_q (t od eng.: *target*), a p_{jq} j -ti element q -tog ulaznog vektora \underline{p}_q namenjenog treniranju. Konstanta α je takozvana brzina učenja (eng.: *Learning Rate*) i obično ima malu pozitivnu vrednost. Nadogradnju Hebovog pravila predstavlja, takozvano, Delta-pravilo (eng.: *Delta Rule*) u

literaturi poznatije kao algoritam Vidrou-Hof (Widrow-Hoff). Kod ove metode, pri određivanju vrednosti težinskih koeficijenata, željena vrednost izlaza mreže zamenjena je razlikom između željene i trenutne vrednosti izlaza, što može da se iskaže kao:

$$w_{ij}^{novo} = w_{ij}^{staro} + \alpha (t_{iq} - a_{iq}) p_{jq}, i = [1, S], j = [1, R] \quad (3.19)$$

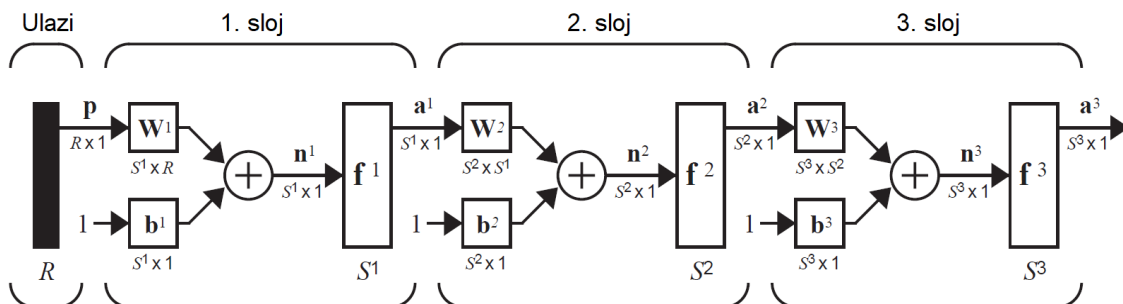
Osnovna prednost Delta pravila se ogleda u mogućnosti adaptivnog korigovanja težinskih koeficijenata, u slučaju dostupnosti novih parova ulazno-izlaznih veličina koje dati model treba da opiše. Ovakav način određivanja parametara modela se primenjuje pri konstruisanju adaptivnih filtera zasnovanih na metodi najmanjih kvadrata (u daljem tekstu MNK, eng.: *LMS - Least Mean Square*) [51].

U praksi se češće koriste neuronske mreže koje poseduju veći broj slojeva. Takve mreže se u literaturi nazivaju VSNM (eng.: *MLP - Multiple Layers of Perceptrons*), a slojevi se dele na ulazni sloj, skrivene slojeve i izlazni sloj. Skrivenih slojeva u VSNM može da bude nula ili više. Na slici 3.4 dat je šematski prikaz perceptrona pojedinih slojeva VSNM mreže. Na ulazu postoji $p_i, i = [1, R]$ ulaza koji se prosleđuju na S^1 neurona prvog, tj. ulaznog sloja, potom se informacije prosleđuju na S^2 neurona drugog sloja itd. Primenom osnovne relacije za određivanje uzajamne zavisnosti izlaznih vrednosti sloja neurona, (jednačina 3.16), moguće je odrediti izlazne vrednosti svakog sloja posebno kao:

$$\begin{aligned} a^1 &= f^1 (\mathbf{W}^1 p + b^1) \\ a^2 &= f^2 (\mathbf{W}^2 a^1 + b^2) \\ a^3 &= f^3 (\mathbf{W}^3 a^2 + b^3) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Kombinovanjem prethodnih jednačina dobija se zavisnost izlaznog sloja VSNM u funkciji ulaznih veličina i nelinearnog odnosa koeficijenata mreže prema:

$$a^3 = f^3 (\mathbf{W}^3 f^2 (\mathbf{W}^2 f^1 (\mathbf{W}^1 p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (3.21)$$



Slika 3.4.: Šematski prikaz VNM sa više skrivenih slojeva (VSNM) [44].

Algoritam određivanja težinskih koeficijenata VSNM neuronske mreže se zasniva na generalizovanom Vidrou-Hof algoritamu, i naziva se *backpropagation* [44]. Ovaj algoritam, takođe, karakteriše gradijentna metoda zasnovana na praćenju srednjeg kvadratnog odstupanja greške. Jedina razlika između klasičnih MNK i *backpropagation* algoritama se ogleda u načinu na koji se određuju gradijenti. Odstupanje izlazne vrednosti VNM sačinjene od jednog sloja je linearna funkcija težinskih koeficijenata mreže (jed. 3.16), tako da gradijentna metoda može jednostavno da se primeni. Kod VSNM, nelinearna zavisnost izlaza aktivacione funkcije u kombinaciji sa uzajamnim dejstvom težinskih koeficijenata (jed. 3.21) ograničava primenu klasične gradijentne metode i Delta-pravila. Kako bi se uspešno odredile vrednosti težinskih koeficijenata, pristupa se praćenju vrednosti greške, odnosno analizira se propagiranje greške kroz slojeve VSNM, a postupak se sprovodi od izlaznog sloja ka ulaznom, jer se kao početni uslov iterativnog procesa postavlja željena (nulta) vrednost greške na izlazu VNM u odnosu na ciljane vrednosti. U literaturi [52, 53] se može pronaći više detalja o *backpropagation* algoritamu.

3.2.1. Funkcije radijalne osnove

Posebnu kategoriju aktivacionih funkcija VNM čine funkcije radijalne osnove (u daljem tekstu FRO, eng.: *Radial Basis Function*). U načelu, to su funkcije čija vrednost zavisi od argumenta x koji je norma (udaljenje) ulazne promenljive $\underline{u} = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$ u odnosu na centar FRO $\underline{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ip}]^T$, izražena kao:

$$x_i = \|\underline{u} - \underline{c}_i\| = \sqrt{(\underline{u} - \underline{c}_i)^T (\underline{u} - \underline{c}_i)} \quad (3.22)$$

Norma vektora ulazne promenljive može biti određena upotrebom Mahalanobisove norme $\underline{\Sigma}(\sigma)$, koja se u najjednostavnijem slučaju izjednačava sa jediničnom

matricom I , ali ukoliko to nije slučaj, ovakav način određivanja norme pri konstruiranju FRO omogućava transformaciju osnovnih koordinata p -dimenzionog prostora ulaznih veličina (u smislu rotacije i otklona) [43]. Mahalanobisova norma predstavlja određivanje udaljenja datih tačaka uzimajući u obzir verovatnoću nalaženja tačaka u prostoru. Na taj način moguće je razlikovati tačku koja ima „ekstremnije” (manje verovatno) udaljenje od centra u poređenju sa nekom drugom tačkom, iako obe tačke karakteriše identična Euklidova distanca [54]. Time izraz 3.22 dobija oblik:

$$x_i = \|\underline{u} - \underline{c}_i\|_{\underline{\Sigma}_i} = \sqrt{(\underline{u} - \underline{c}_i)^T \underline{\Sigma}_i^{-1} (\underline{u} - \underline{c}_i)} \quad (3.23)$$

Odabir aktivacione funkcije se uglavnom svodi na Gausovu funkciju oblika:

$$g(x) = e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (3.24)$$

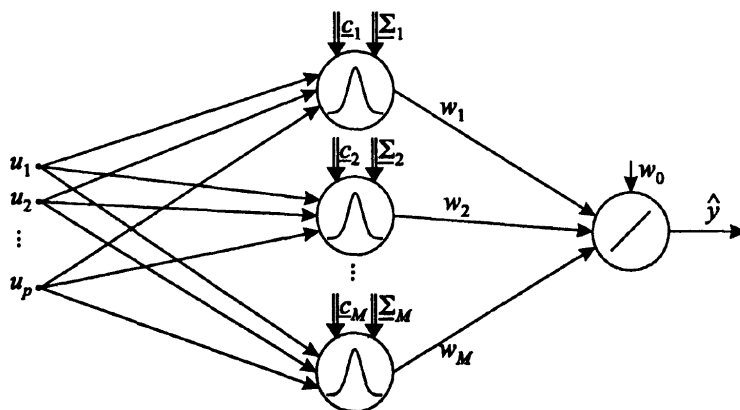
Kombinovanjem jednačina 3.23 i 3.24 dobija se osnovna funkcija Gausove FRO:

$$\Phi_i(\underline{u}, \underline{\theta}_i^{(nl)}) = e^{-\frac{1}{2}\|\underline{u} - \underline{c}_i\|_{\underline{\Sigma}_i}^2} \quad (3.25)$$

Ukoliko je u paralelu postavljeno nekoliko neurona koje karakteriše aktivaciona FRO, a njihovi izlazi proseleđeni neuronu koji čini izlazni sloj mreže, formirana je najjednostavnija veštačka neuronska mreža sa funkcijama radijalne osnove. Pozivajući se na prethodna izvođenja, opšta jednačina FRO mreže ima formu:

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^M w_i \Phi_i\left(\|\underline{u} - \underline{c}_i\|_{\underline{\Sigma}_i}\right) \quad (3.26)$$

gde su sa w_i označeni težinski koeficijenti za M neurona unutar skrivenog sloja i ukupno p ulaznih veličina. Odgovarajući primer takve VNM je prikazan na slici 3.5. Treniranje FRO mreže se zasniva na određivanju težinskih koeficijenata w_i , poziciji centara \underline{c}_i i širine osnovne funkcije izražene preko $\underline{\Sigma}_i$ (σ). Pri formiranju FRO mreže se ne preporučuje definisanje višestrukih skrivenih slojeva, jer ukoliko je to slučaj, izlazi prvog sloja će pokriti u potpunosti p -dimenzioni prostor ulaznih veličina, čime će biti uskraćena mogućnost primene predznanja o objektu prilikom odabira pozicija centara čvorova drugog i svih narednih skrivenih slojeva mreže. Osnovna prednost FRO mreža u poređenju sa VSNM se ogleda mogućnosti primene metode najmanjih kvadrata za određivanje težinskih koeficijenata, pod uslovom da su unapred određene pozicije čvorova i širine podmodela.



Slika 3.5.: Veštačka neuronska mreža sačinjena od funkcija radijalne osnove (FRO) i odgovarajućih težinskih faktora [43].

Ukoliko nije definisana struktura FRO modela u smislu poželjnog broja čvorova ili tipa aktivacione funkcije, potrebno je izvršiti proveru arhitekture aktivacione funkcije čijom primenom će se dobiti mreža koja najbolje aproksimira raspoložive podatke. Pored Gausove aktivacione funkcije (jednačina 3.24), primenjuju se i sledeće kategorije lokalno nelinearnih funkcija (eng.: *kernel*):

$g(x) = \sqrt{x^2 + a^2}$ Multikvadratna funkcija gde je a slobodan član (**multiquadric**);

$g(x) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + a^2}}$ Inverzna multikvadratna funkcija (**recmultiquadric**);

$g(x) = x^2 \ln x$ Posebna kategorija aproksimativnog splajna koji je uslovljen maksimalnim zakrivljenjem aproksimacije, tj. takozvani *Thin Plate Spline* (**thinplate**);

$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-aTx}}$ Modeli logističke regresije (eng.: *Kernel Logistic Regression - KLR*) [55] (**logisticrbf**);

Wendland Posebna kategorija pozitivno definitnih polinomskih modela [56] (**WendlandC2** i **WendlandC4**);

$g(x) = x^3$ Kubni splajn (**cubicrbf**) [57].

Za određivanje vrednosti težinskih koeficijenata, broja i pozicije centara FRO mreže, koriste se metode nelinearne optimizacije zasnovane na metodi najbržeg pada, Njutnovoj metodi ili metodi konjugovanih gradijenata [44]. Međutim, prednost FRO mreža, u poređenju sa ostalim arhitekturama VNM, se ogleda u mogućnosti primene linearnih optimizacionih algoritama, što doprinosi bržem treniranju i konvergenciji

ka tačnijem rešenju [58]. Preduslov za ovakav način određivanja nepoznatih parametara jeste sagledavanje raspodele dostupnih parova podataka (vektora) unutar prostora ulaznih veličina. Inicijalne pozicije centara mogu da se odrede:

- Nasumičnim izborom iz skupa dostupnih podataka na osnovu kojih se vrši treniranje;
- Generisanjem nasumičnih vektora unutar prostora ulaznih veličina;
- Vektorima koji odgovaraju tačkama regularnih projekcija uniformno podeljenog p - dimenzionog prostora ulaznih veličina;
- Algoritmima za klasterizaciju (*k-means clustering*).

Nakon određivanja pozicija centara FRO, težinski koeficijenti se određuju metodom najmanjih kvadrata, čime se dobijaju zadovoljavajući rezultati. Osnovni nedostatak ovakve metode treniranja je nepoznat broj centara za koji će aproksimacija biti dovoljno tačna, tako da se obično formira aproksimavni model sa većim brojem centara nego što je neophodno, a time se povećava mogućnost pojave preteranog prilagođenja modela.

Sledeću kategoriju algoritama, koji se koriste pri određivanju nepoznatih parametara mreže FRO, čine algoritmi koji za svaki par ulazno-izlaznih podataka namenjenih treniranju, formiraju centar FRO, a potom sukcesivno odbacuju čvorove koji imaju najmanji uticaj na konačni oblik aproksimacije (analogno metodi višestruke postepene regresije za optimizaciju članova polinomskih modela). Ovakve metode se zasnivaju na ortogonalnoj dekompoziciji, a u okviru poglavlja 8 će biti prikazani rezultati primene takozvanog algoritma *Recursive Orthogonal Least Squares - ROLS* [59, 60]. Pri definisanju parametara aproksimativnog modela FRO korišće se prethodno navedene aktivacione funkcije u paraleli sa višestrukim vrednostima maksimalno dozvoljenog broja centara posmatranog modela. Na taj način će biti formirana populacija potencijalnih rešenja od kojih će, na osnovu statističkih parametara, biti odabrana najbolja aproksimacija u smislu tačnosti i kompleksnosti. Treba napomenuti da će biti korišćene takozvane hibridne FRO, koje imaju veću fleksibilnost u poređenju sa klasičnim FRO, a karakteriše ih dodatna višedimenziona polinomska aproksimacija prvog reda kao osnova, na koju je dodata optimizovana FRO po pitanju broja čvorova, adekvatne aktivacione funkcije i težinskih koeficijenata.

3.2.2. Funkcije Gausovog procesa

Funkcije regresionog Gausovog procesa (GP) se zasnivaju na pretpostavci da će izlazne vrednosti aproksimativnog modela biti međusobno slične ukoliko su argumenti (prediktori) funkcije međusobno slični. Odnos između izlaznih vrednosti aproksimacije:

$$f(\mathbf{x}_i) \approx f(\mathbf{x}_j) \mid i = 1, 2, \dots, n, j \neq i, j \approx i \quad (3.27)$$

je isključivo funkcija sličnosti posmatranih argumenata, a kvantifikuje se odgovarajućom matricom sličnosti, odnosno kovarjansnom matricom [61]. Ako se posmatra populacija prediktora, definisanih vektorima \mathbf{x}_i za $i = 1, \dots, n$ posmatranih tačaka i pri $\mathbf{x}_{p \times 1}$, gde je p dimenzionalnost prostora, bilo koja tačka iz \mathbf{x}_i može da se opiše funkcijom verovatnoće prema Gausovoj raspodeli kao:

$$[\mathbf{x}] \sim N([\boldsymbol{\mu}], [\mathbf{E}(\mathbf{x})]) \quad (3.28)$$

gde je $\boldsymbol{\mu}$ srednja vrednost vektora \mathbf{x} i $\mathbf{E}_{p \times p}(\mathbf{x})$ matrica koja definiše sličnosti između pojedinih elemenata vektora \mathbf{x} . U najjednostavnijem obliku, kovarijansa, kao mera sličnosti između članova x_i i x_j , određuje se putem skalarnog proizvoda vektora (za apsolutno poklapanje rezultat je 1, a za potpuno različite vektore rezultat je 0), ali postoje i druge metode za „mapiranje” pomenutih odnosa. Funkcije koje se u tom smislu koriste, označavaju se sa $k(x_i, x_j)$ i nazivaju se osnovne funkcije (eng.: *Kernel Functions*). Pri određivanju aproksimacija funkcijama Gausovog procesa, značajnu ulogu ima parametrizacija osnovne funkcije vektorom $\boldsymbol{\theta}$ koji omogućava primenu metoda uslovne verovatnoće pri određivanju aproksimacije. U tom slučaju osnovna funkcija ima oblik $k(x_i, x_j \mid \boldsymbol{\theta})$, a najčešće primenjivane osnovne funkcije se parametrizuju posredno, uzimajući u obzir standardno odstupanje σ_f i karakterističnu razdaljinu σ_l [62]. Karakteristična razdaljina opisuje najmanju udaljenost između prediktora x_i i x_j za koju neće postojati korelacija, odnosno sličnost. U tom slučaju važi $k(x_i, x_j \mid \boldsymbol{\theta}(\sigma_f, \sigma_l)) = 0$. Pri određivanju aproksimativnih GP modela, na osnovu podataka prikupljenih ispitivanjem motora, korišćene su sledeće osnovne funkcije:

- Kvadrirana eksponencijalna osnovna funkcija:

$$k(x_i, x_j \mid \boldsymbol{\theta}) = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}{\sigma_l^2}\right) \quad (3.29)$$

- Eksponencijalna osnovna funkcija:

$$k(x_i, x_j | \boldsymbol{\theta}) = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{r}{\sigma_l}\right) \quad (3.30)$$

gde je $r = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}$.

- Maternova tropolovinska osnovna funkcija (Matérn 3/2) po Bertilu Maternu (šve.: Bertil Matérn) [61]:

$$k(x_i, x_j | \boldsymbol{\theta}) = \sigma_f^2 \left(1 + \frac{\sqrt{3}r}{\sigma_l}\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{3}r}{\sigma_l}\right) \quad (3.31)$$

- Maternova petopolovinska osnovna funkcija (Matérn 5/2) [61]:

$$k(x_i, x_j | \boldsymbol{\theta}) = \sigma_f^2 \left(1 + \frac{\sqrt{5}r}{\sigma_l} + \frac{5r^2}{3\sigma_l^2}\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{5}r}{\sigma_l}\right) \quad (3.32)$$

- Racionalna kvadratna osnovna funkcija:

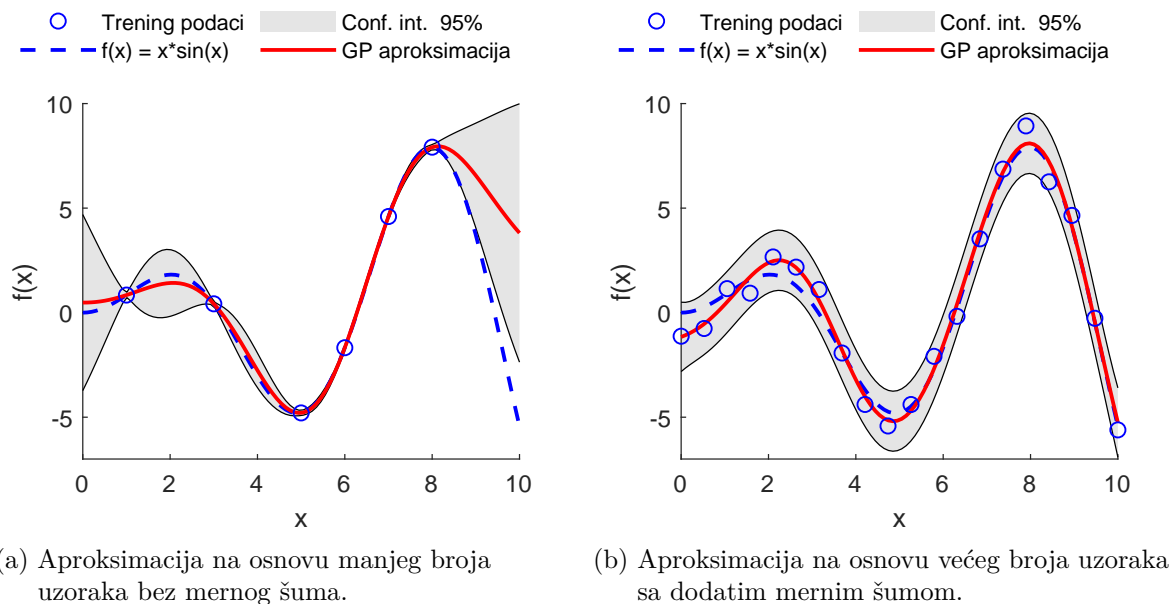
$$k(x_i, x_j | \boldsymbol{\theta}) = \sigma_f^2 \left(1 + \frac{r^2}{2\alpha\sigma_l^2}\right)^{-\alpha} \quad (3.33)$$

gde je α pozitivna konstanta.

U literaturi [63] se mogu pronaći oblici osnovnih funkcija koji podrazumevaju zasebnu parametrizaciju svakog prediktora na osnovu koeficijenta σ_m za $m = 1, 2, \dots, d$ gde je d ukupan broj prediktora. Ovakve osnovne funkcije poseduju mogućnost automatskog određivanja relevantnosti prediktora (u daljem tekstu AORP, eng.: *ARD - Automatic Relevance Determination*). Za svaku od navedenih osnovnih funkcija, postoji fleksibilnija AORP varijanta. U nastavku je prikazana takozvana AORP kvadrirana eksponencijalna osnovna funkcija oblika:

$$k(x_i, x_j | \boldsymbol{\theta}) = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{m=1}^d \frac{(x_{im} - x_{jm})^2}{\sigma_m^2}\right) \quad (3.34)$$

Na slici 3.6 je dat primer aproksimacije funkcijom Gausovog procesa sa prethodnom osnovnom funkcijom, za manji skup podataka za učenje bez dodatog mernog šuma (slika a) i za veći skup uzoraka na osnovu kojih se formira aproksimacija sa veštački dodatim mernim šumom (slika b).

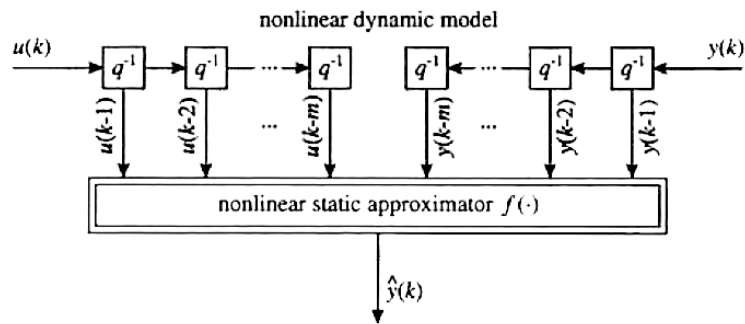


Slika 3.6.: Primer aproksimacije funkcijom Gausovog procesa.

3.2.3. Dinamički nelinearni modeli

Nelinearni matematički modeli, odnosno VNM kod kojih se informacije isključivo prosleđuju od ulaznog ka izlaznom sloju, spadaju u kategoriju jednosmernih (eng.: *Feedforward*) neuronskih mreža. Ovakvi modeli omogućavaju stacionarno preslikavanje domena ulaznih veličina na domen izlaznih veličina. Kako bi se opisala dinamika procesa, u opštem slučaju, neophodno je da postoji informacija o promeni što se postiže analizom razlike posmatrane vrednosti kroz vreme (ulaza, izlaza ili kombinovano). S obzirom da se radi o diskretnim modelima, informacija o promeni je dostupna ukoliko je moguće poređenje date veličine u različitim vremenskim instancama, tj. ukoliko postoji način za efikasno pamćenje (memorisanje) prethodnih događaja.

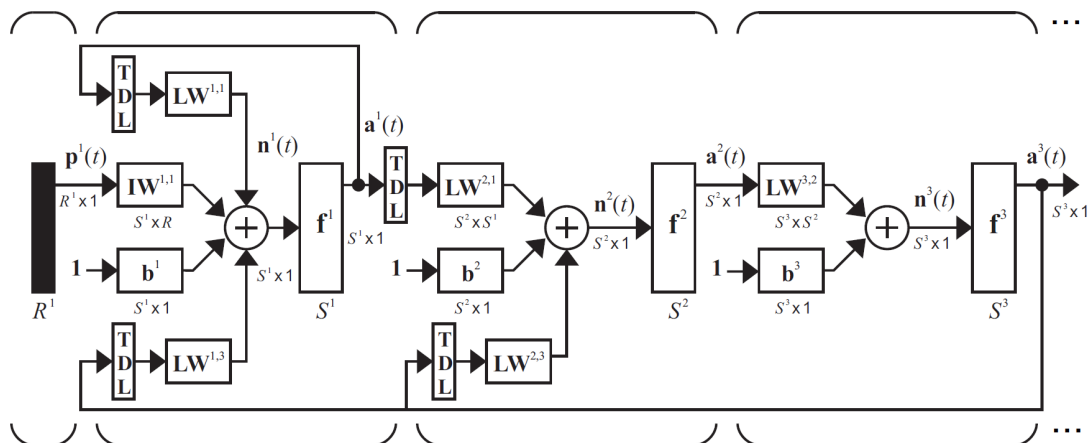
Osnovni element za vremensko klizanje datog signala je q^{-1} filter, a njegovom primenom se prosleđuje informacija iz prethodnog vremenskog trenutka [43]. U literaturi se ovakvi elementi označavaju i simbolom D . Ovi elementi nisu ograničeni samo na prethodnu vrednost, već mogu biti redno povezani čime se omogućava dalekosežnija memorija. Nezavisno od oblika matematičkog modela, promenom q^{-1} filtera, dobija se arhitektura takozvane eksterne dinamike, kao što je prikazano na slici 3.7. U ovom slučaju, pronalaženje koeficijenata matematičkog modela se ne razlikuje od klasičnih metoda obuke VNM.



Slika 3.7.: Dinamički proces modeliran stacionarnim aproksimatorom i serijom q^{-1} filtera [43].

Kombinacija stacionarnog polinomskog aproksimatora i serije vremenskih otklona posmatranih ulaza ili izlaza (ili kombinovano) omogućava formiranje matematičkih modela tipa: Voltera-niz (*Volterra-Series*), Hamerštajn (*Hammerstein*), Viner (*Wiener*) i Hamerštajn-Viner (*Hammerstein-Wiener*). Više detalja o ovakvim modelima, može se pronaći u literaturi [43, 64].

Nelinearne matematičke modele, koji se koriste za opisivanje dinamičkih procesa, karakteriše postojanje rekurentne veze, a zasnivanju se na takozvanoj NARX (eng.: *Nonlinear Autoregressive models with exogenous inputs*) arhitekturi. Rekurentna, odnosno povratna veza, omogućava modeliranje na osnovu trenutnih i prethodnih vrednosti ulaznih i/ili izlaznih (modeliranih) veličina, kao i na osnovu rezultata nekog od unutrašnjih slojeva VNM, kao što je prikazano na slici 3.8. Elementi blok dijagrama koji imaju ulogu q^{-1} filtera su označeni sa TDL (eng.: *Tapped Delay Line*).



Slika 3.8.: Dinamička neuronska mreža (NARX) sa rekurentnim vezama i elementima za vremenski otklon (označeni sa TDL) [44].

Dimenzionalnost vektora ulaznih i izlaznih veličina VNM u određenoj meri definiše kompleksnost modela, ali pri praktičnoj realizaciji ostaje otvoreno pitanje arhitekture VNM, odnosno potrebnog broja skrivenih slojeva, broja neurona unutar svakog od njih, pozicije veza, postojanje rekurentnih sinapsi, oblika aktivacionih funkcija, postojanja otklona, inicijalizacije itd. Nažalost, još uvek nisu razvijene metode koje mogu da upute korisnika u kom pravcu treba razvijati strukturu VNM za datu kategoriju problema, tako da se proces uglavnom svodi na metodu pokušaja i pogrešaka. U literaturi postoje različite preporuke za maksimalni nivo složenosti VNM pri rešavanju inženjerskih problema, ali za razliku od analitičkih modela, i dalje ostaje problem neintuitivnog određivanja granica modela, provere, pouzdanosti i stabilnosti.

4. Plan ispitivanja motora SUS

Iako je motor SUS toplotna mašina, svaki radni ciklus je okarakterisan određenim pojavama strujne i mehaničke prirode koje utiču na performanse i kvalitet rada na datom radnom režimu. Veličine koje karakterišu nevedene pojave su uglavnom nestacionarne što je uslovljeno konceptom rada motora SUS, odnosno promenljivom zapreminom radnog prostora koju omogućava pravolinijski oscilatorno kretanje klipa. Radi poboljšanja performansi motora i boljeg razumevanja radnog procesa, sprovođenjem postupka ispitivanja motora se utvrđuju pogonske veličine, tj. efektivni parametri rada motora. Uobičajeno, pogonski parametri se nazivaju i izlazne motorske veličine, a na prvom mestu se izdvajaju broj obrtaja, efektivni obrtni moment, ekonomičnost, pouzdanost i izdržljivost motora. Takođe, ispitivanjem motora se stiče uvid u indikatorske parametre, koji omogućavaju još precizniju analizu radnog ciklusa motora. Više detalja, na ovu temu, biće dato u poglavlju 5 pri opisu akvizicionih platformi korišćenih prilikom laboratorijskog ispitivanja motora.

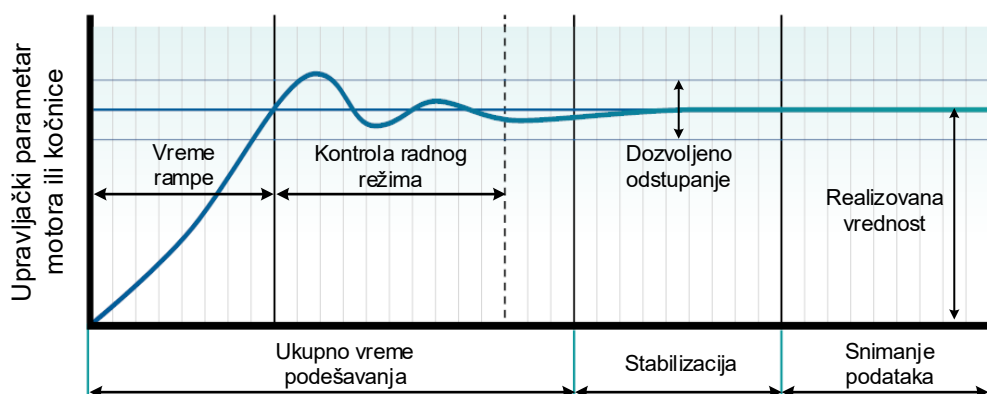
Neposredan rezultat procesa laboratorijskog ispitivanja motora su podaci [65]. Proces ispitivanja motora može da ima različite pojedinačne ili kombinovane ciljeve, a neki od njih su: identifikacija radnog procesa, kalibracija upravljačkih parametara, verifikacija određene konstrukcije ili upravljačke izmene, homologacija ili potvrđivanje performansi, testiranje izdržljivosti pojedinih komponenti itd. Takođe, ispitivanje motora služi i kao platforma za razvoj pratećih sistema i opreme motora, ako i za razvoj laboratorijske merne opreme. Kako bi rezultati ispitivanja mogli što efikasnije da se iskoriste, a u skladu sa ciljem ispitivanja, formiranju plana ispitivanja se posvećuje posebna pažnja. U tom smislu se primenjuju koncepti dizajna eksperimenta za kvazistacionarna i dinamička ispitivanja koji će biti opisani u nastavku. Plan ispitivanja je kompromis brojnih faktora, počevši od zahteva koji se postavljaju pri odabiru matematičkog modela, pa sve do mogućnosti i performansi ispitivanog objekata i merne instrumentacije.

Za potrebe kvazistacionarnog ispitivanja motora, neophodno je poznavanje adekvatnih granica upravljačkih parametara, čijim se podešavanjem obezbeđuje regularan radni režim, bez bojazni od oštećenja motora ili merne opreme. U okviru ovog

istraživanja, granice upravljačkih parametara su svedene na opseg brzinskih režima prema preporuci proizvođača motora, dok je opterećenje varirano od minimalne do maksimalne vrednosti prema logici originalne upravljačke jedinice motora.

4.1. Kvizistacionarno ispitivanje motora SUS

Tokom ispitivanja motora po stacionarnom planu, podaci se beleže u odgovarajuće datoteke tek nakon isteka vremena neophodnog za podešavanje i stabilizaciju radnog režima, odnosno kada se srednje vrednosti otklona karakterističnih veličina ustale unutar unapred definisanih granica. Primer promene izlazne veličine pri podešavanju novog radnog režima prikazan je na slici 4.1. Tokom ovog perioda, vrednost mernog signala je uslovljena dinamičkom karakteristikom korišćenog senzora kao i mehaničkim, strujno-termodinamičkim procesima koji se odvijaju u motoru. Pored navedenog, ukupno vreme neophodno za stabilizaciju posmatrane izlazne veličine zavisice od od ukupnog otklona stacionarne vrednosti u odnosu na stacionarnu vrednost prethodno ispitivanog radnog režima. Ukoliko je promena upravljačkih parametara takva, da rezultuje relativno malim promenama izlaznih veličina, vreme stabilizacije će biti kraće i podaci stacionarnog ispitivanja će moći efikasnije da se prikupljaju. U okviru ovog poglavlja će biti analizirane različite mogućnosti formiranja plana kvizistacionarnog ispitivanja u smislu izbora radnih režima, dok će u poglavlju 9 biti dato više detalja o formiranju optimalnog redosleda ispitivanja odabranih režima kako bi celokupan eksperiment trajao što kraće.



Slika 4.1.: Stabilizacija posmatrane merene veličine nakon promene radnog režima [34].

Termičko stanje motora, izraženo posredstvom vrednosti temperature zidova rad-

nog prostora, predstavlja parametar koji se najsporije menja sa promenom radnog režima. Iz tog razloga, smatra se da termičko stanje motora ima najveću termički inerciju. S obzirom na to da se ova veličina ne meri pri upotrebi komercijalnih (posebno vozilskih) motora, uobičajena praksa nalaže da se pri određivanju uslovne stabilnosti radnog režima posmatra temperatura izduvnih gasova motora. Vrednost ove veličine u velikoj meri zavisi od procesa prenosa toplote kroz elemente izduvnog sistema, a obzirom na to da je prenos toplote funkcija razlike temperatura i toplotnog kapaciteta elemenata posmatranog sistema, očekivano je i duže vreme neophodno za stabilna očitavanja nakon promene radnog režima. U prilog tome ide i činjenica da su unutar radnog područja motora opsezi temperatura izduvnih gasova najveći, za razliku od merenja temperature na ostalim mernim mestima. Vreme neophodno za stabilizaciju očitavanja temperature izduvnih gasova tokom ispitivanja vozilskih motora traje u proseku od 2 do 5 minuta. Pored osnovnih merenja efektivnih parametara, određivanje sastava i pojedinih fizičkih karakteristika izduvnog gasa može da zahteva produženo vreme stabilizacije radnog režima. Ukoliko se određuje broj čestica ili prozračnost izduvnog gasa, u nekim slučajevima, neophodno je izdvojiti i više od 5 minuta za stabilizaciju radnog režima [14]. Posebna pažnja se savetuje pri ispitivanju režima sa visokom emisijom čestica. Naime, prilikom ispitivanja takvih režima, čestice se deponuju na zidovima izduvnog sistema i ukoliko se pri promeni radnog režima ne sačeka dovoljno dugo, čestice koje su ostale u sistemu, svojim naknadnim odvajanjem mogu da dovedu do greške merenja [66].

Ako se posmatra radno polje motora, razlikuju se nizovi radnih režima ispitanih po takozvanim:

- Brzinskim karakteristikama koje predstavljaju zavisnost efektivnih i indikatorskih parametara od ugaone brzine kolenastog vratila, odnosno broja obrtaja motora pri konstantnom opterećenju motora;
- Karakteristikama opterećenja koje predstavljaju tok posmatranih parametara u funkciji opterećenja motora pri konstantnom broju obrtaja motora.

Metode ispitivanja motora po navedenim karakteristikama se često primenjuju jer je realizacija takvog ispitivanja najjednostavnija. Potrebno je menjati samo jedan upravljački parametar na domenu globalnih promenljivih, na primer broj obrtaja n , i ostale lokalne promenljive samo u funkciji jednog globalnog parametra, na primer ugao pretpaljenja $\alpha_{pp}(n)$, vreme ubrizgavanja $t_{inj}(n)$ itd.

S obzirom na dimenzionalnost i broj upravljačkih veličina, ispitivanje po određenoj karakteristici ne mora da bude uslovljeno brojem obrtaja i opterećenjem mo-

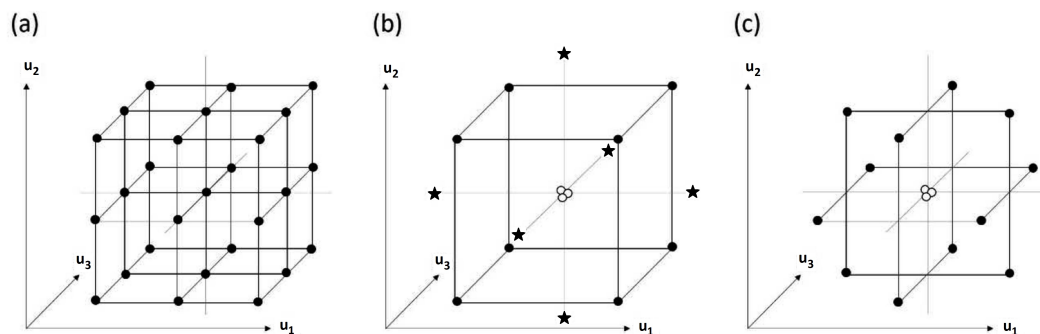
tora. Primer ispitivanja motora na ustaljenom broju obrtaja i ustaljenom srednjem indiciranom pritisku kao merilu opterećenja motora, za različite vrednosti početka ubrizgavanja u ugaonom domenu (eng.: *SOI - Start of Injection*) dao bi zavisnost merenih veličina u funkciji variranog parametra, što ne predstavlja ni brzinsku, ni karakteristiku opterećenja. Ispitivanje motora po svim karakteristikama i kombinacijama upravljačkih parametara nije praktično i iz tog razloga se razvijaju metode za odabir redukovano broja tačaka plana ispitivanja čijom bi se realizacijom na probnom stolu obezbedili podaci za formiranje aproksimativnih matematičkih modela. Neke od metoda za formiranje plana stacionarnog ispitivanja su prikazane nastavku.

4.1.1. Centralni kompozitni dizajn

Boks-Vilsonov (Box-Wilson) ili centralni kompozitni plan - CKP (eng.: *CCD - Central Composite Design*), predstavlja redukovanu verziju plana ispitivanja punog opsega. Ovakav plan ispitivanja je razvijen sa idejom prikupljanja tačaka koje omogućavaju najkvalitetnije formiranje polinomskih matematičkih modela, najviše drugog reda, sa kompletnim ukrštanjem članova nezavisnih promeljivih veličina. Jednačinom 4.1 su predstavljeni članovi polinomskog modela za tri nezavisna upravljačka parametra, u_1 , u_2 i u_3 :

$$\hat{y}(\underline{u}) = c_1 + c_2u_1 + c_3u_2 + c_4u_3 + c_5u_1^2 + c_6u_1u_2 + c_7u_1u_3 + c_8u_2^2 + c_9u_2u_3 + c_{10}u_3^2 \quad (4.1)$$

Ova jednačina će biti drugog reda ukoliko barem jedan od koeficijenata koji stoje uz članove drugog reda (c_5 do c_{10}) bude različit od nule. Sa porastom broja nezavisnih veličina za koje je potrebno formirati plan ispitivanja, raste broj članova polinomskog modela, a shodno tome i populacija ispitivanih tačaka mora da bude ogovarajuća. Najmanji broj tačaka plana ispitivanja mora da bude najmanje jednak broju slobodnih koeficijenata kako bi njihove vrednosti mogle da se odrede primenom metoda linearne regresije. Centralni kompozitni plan u osnovi sadrži ponavljanje ispitivanja na centralnoj tački p - dimenzionog prostora kako bi se povećala tačnost modela u toj oblasti, odnosno odredilo srednje kvadratno odstupanje modela u pomenutoj oblasti.



Slika 4.2.: Plan punog opsega (a), centralni kompozitni plan (b) i Boks-Benken (Box-Behnken) plan (c) za tri nezavisne promenljive [67].

Centralni kompozitni plan za prostor definisan posredstvom tri nezavisne ulazne promenljive je prikazan na slici 4.2b. Tačke koje čine CKP se dele u sledeće grupe:

- Centralne tačke (kojih može da bude više);
- Krajnje tačke koje opisuju inicijalne opsege ulaznih veličina, tj. tačke ispitivanja punog opsega kod koga se razmatraju samo minimalne i maksimalne vrednosti ulaznih veličina;
- Tačke koje se nalaze na pravcima glavnih osa prostiranja plana.

Tačke plana koje su sastavni deo glavnih osa, nazivaju se *aksijalne tačke* i mogu da budu pozicionirane od površine koja opisuje ivicu posmatranog prostora, pa sve do udaljenosti koja bi odgovarala radijusu opisane sfere oko tačaka faktorijskog plana [68]. Parametar koji definiše udaljenost opisan je jednačinom:

$$\alpha = \left(\frac{Q \cdot F}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

gde je:

$$Q = \left(\sqrt{F+T} - \sqrt{F} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$T = 2K + C \quad (4.4)$$

za ukupan broj tačaka faktorijskog dizajna F , koji odgovara dodatom broju tačaka dizajna T pri C centralnih tačaka i K nezavisnih ulaznih veličina [69]. Ukoliko nove tačke dizajna napuštaju okvire unapred definisanih opsega nezavisnih ulaza,

potrebno je izvršiti odgovarajuće skaliranje koordinata posmatranog dizajna. Osnovna karakteristika ovako definisanog plana eksperimenta je mogućnost rotacije osa ulaznih veličina, odnosno bilo kakva rotacija tačaka plana ispitivanja neće imati uticaj na kvalitet formiranog modela, tako da za dizajn može da se kaže da je sferično-simetričan.

Hibridnu verziju CKP, pod nazivom metoda Boks-Benken (Box-Behnken), odlikuje drugačije pozicioniranje dodatih tačaka uz ukidanje tačaka koje su odgovarale faktorijalnom planu, odnosno planu punog opsega. [70]. Primer ovakvog dizajna za tri nezavisne ulazne veličine prikazan je na slici 4.2c. Ovu vrstu formiranja plana ispitivanja odlikuje pozicioniranje tačaka na sredini opsega upravljačkih parametara uz izbegavanje ekstremnih kombinacija, odnosno graničnih tačaka faktorijalnog dizajna. U poređenju sa planom Boks-Vilson, dodavanje tačaka nije funkcija parametra α , tako da su sve nove tačke inicijalno unutar granica upravljačkih veličina, ali i oblast definisanosti modela je nešto manja. S obzirom na to da su krajnje tačke faktorijalnog dizajna izbačene, plan Boks-Benken je u osnovi sferičan, tako da treba izbegavati ekstrapolaciju modela u graničnim oblastima. Za formiranje plana Boks-Benken neophodno je definisanje tri nivoa ulaznih veličina na kojima će biti dodate tačke, a moguće je i izvršiti rotiranje osa dizajna bez uticaja na kvalitet formiranog modela [71].

4.1.2. Optimalni plan

Optimalni plan karakteriše kvantifikovanje izabranih tačaka plana ispitivanja prema nekom statističkom kriterijumu. Postoji više različitih statističkih kriterijuma prema kojima se razlikuju tipovi optimalnog plana, a najpoznatiji među njima su takozvani D-optimalni, A-optimalni i V-optimalni (eng.: *D-, A-, V-Optimal Design*). Optimalni dizajn se koristi u slučajevima kada postoji visok nivo predznanja o ispitivanom objektu u smislu poznavanja granica sistema uz ograničenje na primenu linearnih (polinomskih i hibridnih splajn-polinomskih) matematičkih modela. Postoji mnoštvo algoritama za određivanje tačaka optimalnog plana [72], a u načelu se svode na sledeće:

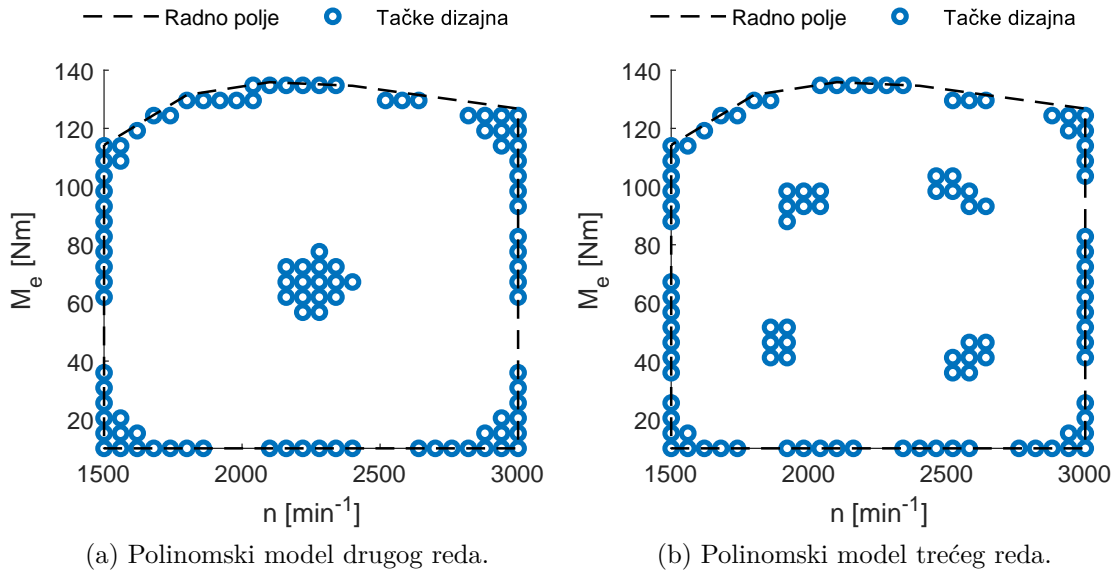
- Određivanje skupa tačaka kandidata iz koga će se birati tačke optimalnog plana. Tačke kandidati mogu da se generišu primenom faktorijalnog plana ili pokretanjem bilo koje kvazi-nasumične sekvence u p - dimenzionom prostoru ulaznih veličina;

- Formiranje inicijalnog optimalnog plana nasumičnim izborom ograničenog broja tačaka iz skupa tačaka kandidata;
- Iterativno dodavanje i odbacivanje ograničenog broja nasumično odabranih tačaka iz seta kandidata prethodno formiranog plana. Ukoliko je plan ispitivanja posmatrane iteracije bolji od prethodnog po kriterijumu optimalnosti, zadržava se, a ukoliko nije, proces dodavanja i odbacivanja tačaka se ponavlja;
- Iterativni proces se prekida ukoliko nema dovoljne promene kriterijuma optimalnosti tokom određenog broja iteracija ili ukoliko se dostigne maksimalno dozvoljeni broj iteracija.

D-optimalni plan je zamišljen da minimizuje varijansu, odnosno standardno odstupanje koeficijenata formiranog regresionog matematičkog modela [73]. Kod višedimenzionih regresionih modela, matrica \mathbf{X} predstavlja matricu vrednosti nezavisnih ulaznih veličina trenutno razmatranog plana ispitivanja. Kod ove metode, minimizacija varijanse koeficijenata regresionog modela se postiže maksimizacijom determinante matrice $\mathbf{X}'\mathbf{X}$ što je predstavljeno parametrom D_{eff} u jednačini 4.5.

$$D_{\text{eff}} = \frac{\ln(\det(\mathbf{X}'\mathbf{X}))}{k} \quad (4.5)$$

gde je k ukupan broj elemenata regresione matrice \mathbf{X} . Matrica $\mathbf{X}'\mathbf{X}$ se još naziva i matrica informacije ili matrica varijanse-kovarijanse. Oznaka D u nazivu ovako određenog kriterijuma optimalnosti potiče od određivanja determinante matrice $\mathbf{X}'\mathbf{X}$. Primer D-optimalnog plana za polinomske modele drugog i trećeg reda prikazan je na slici 4.3. Primećuje se da je pozicioniranje tačaka plana ispitivanja za ograničeno radno polje motora izvršeno tako da se u što većoj meri obuhvate krajnje vrednosti i oblasti u kojima može da se očekuje lokalni minimum ili lokalni maksimum aproksimativnog modela. Polinomski model drugog reda može da ima najviše jedan ekstrem po svakoj nezavisnoj ulaznoj veličini i iz tog razloga su tačke bliže centralnom delu radnog polja koncentrisanije. Tačke koje odgovaraju polinomskom modelu trećeg reda su grupisane tako da se za najkompleksniju aproksimaciju puzdano identifikuju najviše jedan lokalni minimum i lokalni maksimum po svakoj nezavisnoj veličini. Iz tog razloga se uočavaju četiri manje grupe tačaka u centralnom delu dijagrama.



Slika 4.3.: D-optimalni plan za 100 tačaka unutar radnog polja motora za polinom-
ske matematičke modele različitog reda.

Tačke koje su stastavni deo V-optimalnog plana dizajna svojom pozicijom u rad-
nom prostoru nastoje da minimizuju prosečno srednje kvadratno odstupanje greške
aproksimacije, kako bi se obezbedio najprecizniji matematički model. Plan ispitiva-
nja zasnovan na ovako definisanom kriterijumu izbora tačaka se često koristi prilikom
rešavanja problema kalibracije upravljačkih parametara motora SUS. Parametar op-
timalnosti V-optimalnog plana je izražen jednačinom:

$$V_{\text{eff}} = \frac{1}{n_C} \sum_j x_j' (\mathbf{X}'_C \mathbf{X}_C)^{-1} x_j \quad (4.6)$$

gde je x_j pojedinačna vrsta (red) regresione matrice, \mathbf{X}_C koeficijenti regresione
matrice formirane nad svim tačkama kandidatima na osnovu kojih se bira optimalan
plan ispitivanja, a ukupno ih je n_C .

Za ralik od prethodnih, A-Optimalni plan nastoji da minimizuje prosečno kva-
dratno odstupanje regresionih koeficijenata i time poveća sferičnost p -dimenzionog
elipsoida pouzdanosti konačnog matematičkog modela. Kriterijum optimalnosti se
određuje minimizacijom elemenata glavne dijagonale inverzne matrice informacije,
što je opisano jednačinom:

$$A_{\text{eff}} = \sum_j ((\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1})_{jj} \quad (4.7)$$

4.1.3. Pravilo latinskih kvadrata

Metode formiranja plana ispitivanja koje će biti prikazane u nastavku nemaju ograničenja u smislu primene odgovarajuće grupe matematičkih modela, a kao posledica ove činjenice javlja se potreba za relativno većim brojem tačaka u poređenju sa CKP ili optimalnim planom. Ovakve metode nastoje da što ravnomernije popune p -dimenzioni domen upravljačkih veličina ograničenim brojem radnih tačaka uzimajući u obzir određeni nivo predznanja o ispitivanom objektu, a sa ciljem da se dobiju dovoljno tačne aproksimacije izlaznih veličina. Naime, ukoliko se na domenu ulaznih veličina primeni metoda Monte Karlo (Monte Carlo) [74], odnosno uzorkuje ograničeni niz nasumično izabranih tačaka prema uniformnoj raspodeli $\mathbf{U}([u_1], [u_2], \dots)$, kao posledica neuniformne funkcije raspodele mogućih kombinacija ulaznih veličina i raspodele vrednosti izlaza, dobiće se podaci koji ne mogu na najbolji način da se iskoriste pri formiranju matematičkih modela [75]. Monte Karlo metoda nema način za kontrolu gustine tačaka unutar podoblasti radnog polja ispitivanog objekta i iz tog razloga može da se očekuje nesrazmeran odnos minimalne udaljenosti između tačaka eksperimenta [76]. Primer nasumičnog izbora radnih režima za dva nezavisna upravljačka parametra prikazan je na slici 4.4a. Unapređenje nasumičnog izbora vrednosti ulaznih veličina se ogleda u primeni metode latinskih kvadrata koja poseduje mogućnost kontrole gustine tačaka plana ispitivanja, odnosno može ravnomernije da pozicionira tačake unutar radnog polja.

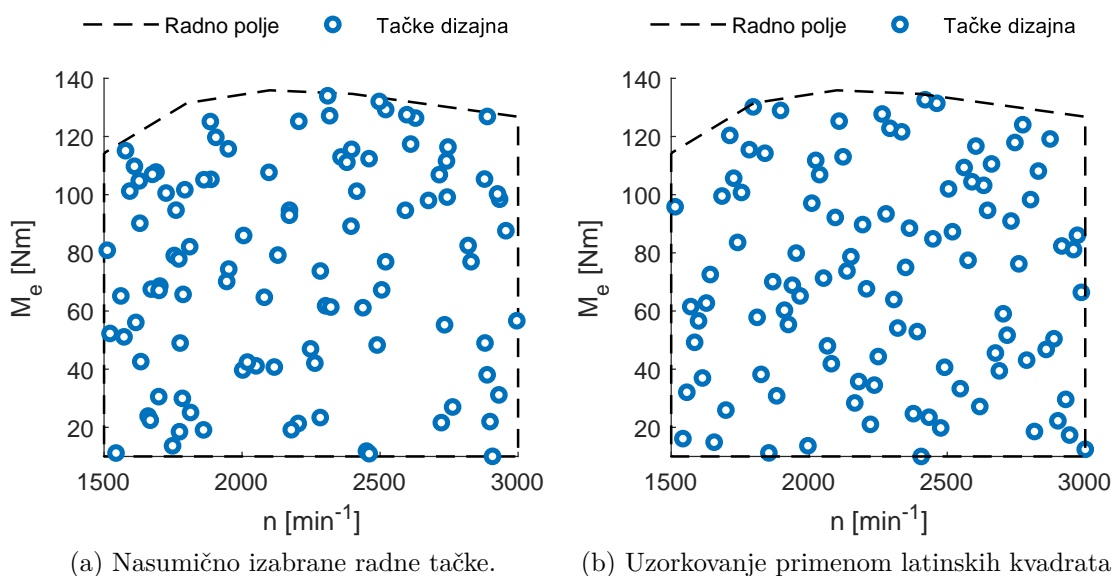
Latinski pravougaonik dimenzija $k \times h$ je matrica sa k vrsta i h kolona (za $k < h$) čiji su elementi razdvojeni u h kategorija tako da elementi u svakoj vrsti i elementi u svakoj koloni budu različiti. Latinski pravougaonik za koji je $k = h$ se naziva latinski kvadrat. U ovom slučaju dimenzija se naziva i red latinskog kvadrata i važi da je to matrica $h \times h$ čija svaka vrsta i svaka kolona sadrži permutaciju skupa od h elemenata [77]. Pridev „latinski” potiče od simbola latinske abecede kao elemenata kvadrata koje je koristio Leonard Ojler (Leonhard Euler) pri razmatranju ovakvih matrica u 18. veku.

Ukoliko se određivanje tačaka plana ispitivanja realizuje primenom metode latinskih kvadrata, dobija se približno nasumičan odabir tačaka klasifikovanih u h kategorija za ravanski problem. Ukoliko je dimenzionalnost upravljanja veća, problem se generalizuje na p -dimenzionom prostoru upravljačkih veličina nad kojima može da se formira latinski hiperprostor kod koga se svaka kategorija simbola sadrži samo jednom u svakoj hiperravni (eng.: *LHS - Latin Hypercube Sampling*). Treba napomenuti da se sa povećanjem dimanzionalnosti p , ne povećava broj diskretnih

kategorija h svake nezavisne upravljачke veličine, što je osnovna prednost posmatranog dizajna. Takođe, praktična realizacija latinskog hiperprostora je relativno jednostavna jer je za osnovnu konfiguraciju algoritma neophodan generator kvazinasumičnih veličina i provera da li se unutar hiperravni koja sadrži koordinate nove tačke već nalazi tačka koja je postala sastavni deo dizajna u nekoj od prethodnih iteracija. Osnovni algoritam za odabir tačaka je moguće nadograditi funkcijama za naknadno prihvatanje ili odbacivanje tačaka kako bi se implementiralo predznanje u smislu poznavanja graničnih vrednosti kombinacija upravljачkih veličina. Takođe, moguća je implementacija sledećih tipova kontrole izabranih tačaka:

- Maksimizacija minimalne udaljenosti između tačaka;
- Minimizacija maksimalne udaljenosti između tačaka;
- Pozicioniranje tačaka na što ravnomerniji način minimizacijom srednjeg kvadratnog odstupanja prosečne zastupljenosti tačaka;
- Minimizacija srednjeg kvadratnog odstupanja kumulativne raspodele verovatnoće (eng.: *CDF* - *Cumulative Distribution Function*) od idealne [78].

Primer latinskog hiperprostora za ograničeno radno polje motora je prikazan na slici 4.4b. Primećuje se ravnomernije pozicioniranje tačaka u odnosu na rezultat nasumičnog izbora tačaka metodom Monte Karlo.



Slika 4.4.: Plan ispitivanja unutar radnog polja motora za 100 nasumično izabranih radnih režima i režimi dobijeni primenom metode latinskog hiperprostora.

4.1.4. Kvazi-nasumične sekvence

Prilikom formiranja plana ispitivanja za jednodimenzioni ili p - dimenzioni problem, poželjno je da tačke budu što ravnomernije raspoređene, odnosno da zastupljenost tačaka bude što uniformnija na posmatranom domenu, kako bi rezultati numeričke analize bili tačniji [79]. Za višedimenzioni problem, projekcija tačaka bi takođe trebala da bude što uniformnija i iz tog razloga planovi ispitivanja zasnovani na faktorijalnom planu ili pravilima rešetke (eng.: *Lattice Rules*) ne mogu da daju dobre rezultate [80]. Drugi značajni uslov odnosi se na ukupan broj tačaka plana ispitivanja koji je u opštem slučaju nepoznat i potrebno je da postoji mogućnost dodavanja tačaka prethodnom planu ispitivanja, kako bi se omogućilo postepeno povećanje tačnosti modela, a uz zadržavanje što uniformnije zastupljenosti projekcija tačaka plana ispitivanja [81].

Najjednostavnija sekvenca za dodavanje tačaka, unutar predefinisano jednodimenzionog domena, koja ispunjava navedene uslove je Van der Korputova (*van der Corput*) sekvenca [82], a karakteriše je razvoj indeksa i za proizvoljno izabranu osnovu sekvence $b \geq 2$. Za nenegativne vrednosti indeksa i , važi jednačina:

$$i = \sum_{l=0}^{\infty} a_l(i) b^l \quad (4.8)$$

gde je $0 \leq a_l(i) < b$ i predstavlja l -ti član pri razvoju indeksne notacije i , što može da se izrazi kao:

$$i = i_0 + i_1 b + i_2 b^2 + \dots, i_r \in \{0, 1, \dots, b-1\} \quad (4.9)$$

Primena inverzne radikalne funkcije $\varphi_b(i)$ osnove b izražene jednačinom:

$$\varphi_b(i) = \sum_{l=0}^{\infty} a_l(i) b^{-l-1} \quad (4.10)$$

daće elemente Van der Korputove sekvence $\omega = (x_i)_{i \geq 0}$ za osnovu b kao:

$$x_i = \varphi_b(i) = \frac{i_0}{b} + \frac{i_1}{b^2} + \frac{i_2}{b^3} + \dots \in [0, 1) \quad (4.11)$$

Kombinovanje elemenata generalizovane Van der Korputove sekvence, za različite osnove b unutar p - dimenzionog prostora, daće takozvanu Haltonovu sekvencu (eng.: *Halton Sequence*) [83, 84].

Različiti prosti brojevi se koriste kao osnove višedimenzionih Haltonovih sekvenci, čiji je primer za 100 tačaka unutar ograničenog radnog polja motora dat na slici 4.5a. Primećeno je da za veće vrednosti osnova $b(p)$ i pri višedimenzionim problemima pojedine projekcije tačaka Haltonovih sekvenci nemaju povoljne karakteristike u smislu uniformnog popunjavanja prostora [85]. Za prevazilaženje ovog problema preporučuje se upotreba nižih vrednosti osnove $b = \{2, 3, 5, 7, 11, \dots\}$, čime se praktično ograničava dimenzionalnost Haltonovih sekvenci. Ukoliko je tražena dimenzionalnost veća, pristupa se ponavljanju vrednosti osnove u više pravaca p -dimenzionog prostora ali tada su koordinate posmatrane tačke u tim pravcima iste, odnosno vrednosti koeficijenata $x_i(p) \in [0, 1)$ koji dele domen p -te ulazne veličine. Rešenje ovog problema ogleda se u linearnoj transformaciji članova $a_l(i)$ i razvoja indeksne notacije i za datu osnovu b , a pre određivanja inverzne radikalne funkcije $\varphi_b(i)$. Primenom ove ideje nastala je kategorija Sobolovih sekvenci (eng.: *Sobol Sequence*) [86] koje karakteriše osnova $b = 2$, ali i linearna transformacija svake koordinate p -dimenzionog prostora. Takođe, postoji kategorija takozvanih Foreovih sekvenci (eng.: *Faure Sequence*) koja se zasniva na identičnoj ideji primene linearne transformacije, ali za različite osnove b [87]. U literaturi se višedimenzionih kvazi nasumičnih sekvenci nazivaju još i digitalne mreže ili digitalne sekvence [88].

Za formiranje Sobolovih sekvenci osnove $b = 2$, neophodno je definisanje primitivnog polinoma unutar Galiosovog polja \mathbf{F}_2 za svaku koordinatu p oblika:

$$p_j(z) = z^{d_j} + a_{j,1}z^{d_j-1} + \dots + a_{j,d_j} \quad (4.12)$$

gde je svaki $a_{j,l} \in \mathbf{F}_2$, a d_j predstavlja red polinoma $p_j(z)$. Potom je potrebno definisati ukupno d_j *direkcionih brojeva* oblika:

$$v_{j,r} = \frac{m_{j,r}}{2^r} \quad (4.13)$$

gde je $m_{j,r}$ neparna celobrojna vrednost izabrana na opsegu $m_{j,r} \in [1, 2^r - 1]$ za $r = 1, \dots, d_j$. Ekspanzija binarnog zapisa direkcionih brojeva $v_{j,r}$ se koristi za određivanje matrice Sobolovih sekvenci i može da se iskaže kao:

$$v_{j,r} = v_{j,r,1}2^{-1} + v_{j,r,2}2^{-2} + \dots + v_{j,r,d_j}2^{-d_j} \quad (4.14)$$

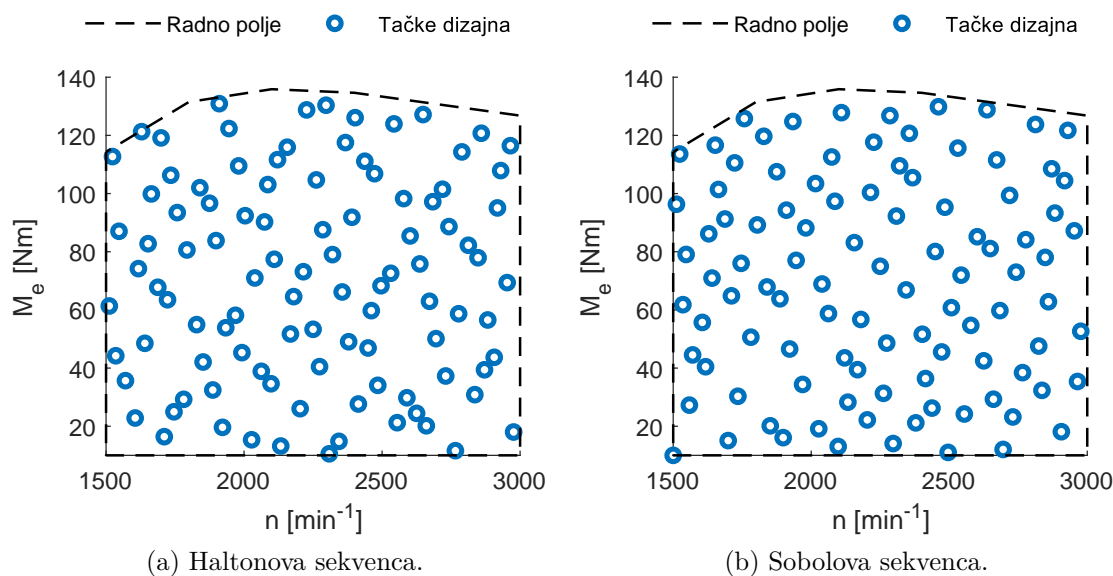
Kada su izabrane vrednosti ukupno d_j direkcionih brojeva, ostale vrednosti $v_{j,r}$ se određuju prema:

$$v_{j,r} = a_{j,1}v_{j,r-1} \oplus \dots \oplus a_{j,d_j-1}v_{j,r-d_j+1} \oplus v_{j,r-d_j} \oplus \left(\frac{v_{j,r-d_j}}{2^{d_j}} \right) \quad (4.15)$$

gde operator \oplus predstavlja sabiranje komponenti vektora unutar \mathbf{F}_2 polja, odnosno izraženo prema Bulovoj algebri, sprovođenje ekskluzivne-ili (XOR) operacije nad binarnim vektorima. Na slici 4.5b je prikazana Sobolova sekvenca za 100 tačaka unutar ograničenog globalnog radnog polja motora. Pored karakteristike uniformnog raspoređivanja tačaka, Sobolova sekvenca poseduje potpuno regularne projekcije svih tačaka dizajna na svaku od osnovnih osa plana, odnosno ne postoji mogućnost ponavljanja koordinate posmatrane tačke na bilo kojoj od osnovnih osa [86].

Iako Sobolova sekvenca ima bolje karakteristike sa aspekta pozicioniranja tačaka za proizvoljno veći broj dimenzija p , za manji broj dimenzija Haltonova sekvenca daje prihvatljive rezultate. Prilikom daljih analiza u ovom radu, posebno u poglavlju 8, biće korišćeni elementi Haltonove sekvence iz sledećih praktičnih razloga:

- Dimenzionalnost upravljanja je niska ($p = 2$) tako da je opravdano korišćenje Haltonove sekvence;
- Pozicije tačaka Halton sekvence su isključivo funkcija dimenzionalnosti, broja tačaka eksperimenta, opsega ulaznih veličina i izabranih vrednosti osnova $b(p)$, za razliku od Sobolove sekvence kod koje figurišu nasumično izabrane promenljive [89]. Kako bi se izbegao uticaj drugačije pozicioniranih tačaka pri određivanju aproksimacija merenih veličina izabrana je Haltonova sekvenca kod koje je variran samo broj tačaka eksperimenta.
- Proces formiranja aproksimacije, odnosno matematičkog modela zahteva nasumični odabir određenog broja tačaka za validaciju, tako da je uniformna raspodela tačaka plana duž osa ulaznih promenljivih veličina svakako narušena, odnosno prednosti Sobolove sekvence nisu od presudnog značaja.



Slika 4.5.: Plan ispitivanja unutar radnog polja motora za 100 tačaka odabranih primenom Haltonove i Sobolove sekvence.

4.2. Dinamička ispitivanja motora SUS

Prethodno navedene metode formiranja plana ispitivanja koriste se u slučajevima velikog broja stepeni slobode sistema upravljanja i karakteriše ih mogućnost izbora redukovano broja radnih režima na kojima je poželjno sprovesti kvazistacionarno ispitivanje kako bi se na osnovu rezultata formirali odgovarajući matematički modeli. S obzirom na to da je reč o kvazistacionarnom ispitivanju, gubitak vremena tokom perioda stabilizacije radnog režima predstavlja neizostavan problem. Sa druge strane, motori SUS se u velikom procentu koriste u dinamičkim uslovima rada, tako da logično sledi ideja dinamičkog ispitivanja motora. Tokom dinamičkog ispitivanja podaci mogu da se snimaju kontinualno, jer uslov stabilnog radnog režima nije obavezan, što je značajna prednost u poređenju sa konvencionalnim metodama, ali ostaje otvoreno pitanje na koji način konfigurisati dinamički test i kako interpretirati dobijene rezultate. S obzirom na to da su mnoge vrednosti koje karakterišu radni proces motora SUS izrazito dinamičke i nelinearne, vrednosti dobijene tokom dinamičkog eksperimenta neće zavisiti od trenutnog stanja upravljačkih i izlaznih veličina, već će zavisiti i od hronološkog redosleda u prikupljanju vrednosti posmatranih veličina. Kada se na ovaj problem doda stohastička priroda pojedinih procesa

i visoka dimenzionalnost upravljanja motorom uz višestruke paralelne zahteve za optimalnošću, jasno je zbog čega dinamičko ispitivanje i dinamička identifikacija radnih parametara motora SUS predstavlja veoma kompleksan problem.

Kao što je pomenuto u poglavlju 3.2.3, dinamički matematički modeli uglavnom sadrže dinamičke filtere (q^{-1}), odnosno elemente modela zadužene za vremensko ofsetovanje ulaznih i izlaznih veličina. Ukupan broj ovako postavljenih elemenata za vremensko kašnjenje definiše red primenjenog matematičkog modela [43]. Drugim rečima, ukoliko je cilj formiranje dinamičkog matematičkog modela, neophodno je obezbediti podatke koji će pored zadovoljavajuće amplitudne pokrivenosti domena upravljanja imati i povoljne karakteristike u smislu promene upravljanja u datom trenutku, odnosno:

$$\underline{u} = f(u_i(k), q^{-1}(u_i(k)), q^{-2}(u_i(k)), \dots), i = [1, p] \quad (4.16)$$

ili

$$\underline{u} = f(u_i(k), u_i(k-1), u_i(k-2), \dots), i = [1, p] \quad (4.17)$$

za ukupno p upravljačkih veličina posmatranih u diskretnom vremenskom trenutku k . Ovime se dimenzionalnost upravljanja povećava shodno stepenu matematičkog modela, a domen koji je ograničavao oblasti dozvoljenih stacionarnih kombinacija upravljačkih veličina se proširuje na domen dozvoljenih granica dinamičkog upravljanja. Radi lakšeg razumevanja dinamičkih granica, uzmimo za primer stacionarni radni režim motora na granici detonantnog sagorevanja. Ukoliko se ugao pretpaljenja blago poveća, sagorevanje će početi ranije, što se ogleda kroz intenzivniji porast pritiska i više temperature u viskopritisnom delu ciklusa. U prvih nekoliko ciklusa detonacija može, a i ne mora, da se pojavi (zbog ciklusnih varijacija), ali kako se radni ciklusi odvijaju, mehanizmima prenosa toplote se postepeno povećava temperatura zidova radnog prostora. Nakon određenog vremena, lokalno, u komori za sagorevanje ostvaruju se povoljni uslovi za pojavu detonantnog sagorevanja i može da se desi da svakim narednim ciklusom detonacija bude sve intenzivnija, što će imati negativne posledice po elemente motorskog mehanizma i mernu opremu. Sa druge strane, ukoliko se sprovede dinamičko upravljanje uglom pretpaljenja na takav način da se ugao pretpaljenja poveća, a ubrzo zatim vrati na početnu vrednost pre pojave uslova za detonantno sagorevanje, motor je bezbedan i reklo bi se da može kratkotrajno da radi sa povećanim uglom pretpaljenja. Drugim rečima, vreme, od-

nosno dinamika upravljanja, igra značajnu ulogu pri određivanju dinamičkih granica posmatranog sistema.

U cilju pojednostavljenja, promene upravljačkih parametara se tokom dinamičkog ispitivanja uobičajeno zadržavaju unutar prethodno određenih stacionarnih granica upravljačkih veličina. Za određivanje stacionarnih granica koristi se posebna kategorija plana ispitivanja koji je namenjen proveriti izvodljivosti određenog radnog režima, takozvani preliminarni DE (eng.: *Screening DoE*), a uglavnom se koristi redukovani višedimenzioni faktorijalni plan [90]. Time se rešava pitanje amplituda upravljačkih veličina, ali neophodno je definisanje optimalnog opsega frekvenci promene upravljačkih veličina kojima treba pobuditi sistem kako bi se u odzivu identifikovale dominantne nelinearnosti i relevantna dinamika procesa.

Po uzoru na stacionarni plan ispitivanja, prilikom izvođenja dinamičkog testa, poželjno je izabrati vrednosti upravljačkog parametra tako da pokrivenost radnog polja bude što uniformnija [91], kao i da što širi spektar harmonika dinamičke pobude poseduje što više vrednosti amplitude [92]. Konačna kontinualna dinamička sekvenca može da se razvije u Furijeov niz oblika:

$$f(t) = \sum_{F=0}^{\infty} (a_F \cos(2\pi Ft) + b_F \sin(2\pi Ft)) \quad (4.18)$$

koji predstavlja sumu harmonika određene frekvence F i amplituda a_F i b_F . Vrednosti koeficijenata F , a_F i b_F se određuju Furijeovom transformacijom koju odlikuje poređenje izvorne sekvence $x(t)$ i harmonijskih funkcija prema jednačinama oblika:

$$X_a(F) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi Ft) dt \quad (4.19)$$

$$X_b(F) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(2\pi Ft) dt \quad (4.20)$$

gde su X_a i X_b nizovi amplituda harmonika odgovarajuće frekvence F . Ako se primeni Ojlerova jednačina koja povezuje trigonometrijske funkcije i kompleksne eksponencijalne funkcije:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (4.21)$$

koeficijenti određeni jednačinama 4.19 i 4.20 mogu da se zamene kompleksnim koeficijentima prema jednačini:

$$X(F) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi Ft} dt \quad (4.22)$$

S obzirom na to da se u praksi formiranje upravljačke sekvence obavlja u vremenskom domenu sa diskretnim instancama, primenjuje se Diskretna Furijeova transformacija (DFT) [93] oblika:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (4.23)$$

za određivanje kompleksnih koeficijenata X_k koji odgovaraju k -toj frekvenci za ukupno N elemenata analizirane dinamičke sekvence.

Pozicioniranje člana $X_k = R_k + iI_k$ na kompleksnoj ravni daće informacije o amplitudi A_k i fazi θ_k harmonika za opseg frekvenci niži od Najkvistove frekvence [94] prema jednačinama:

$$A_k = \frac{2\sqrt{R_k^2 + I_k^2}}{N} \quad (4.24)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{I_k}{R_k} \quad (4.25)$$

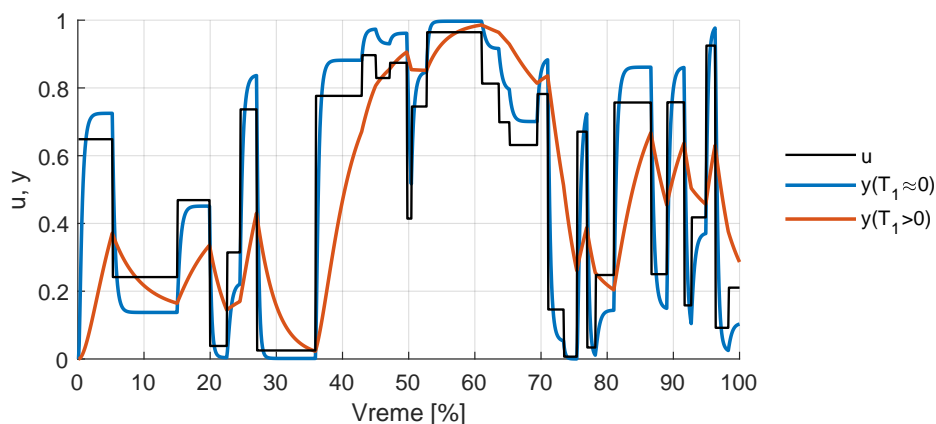
Amplitudna zastupljenost pojedinih harmonika igra važnu ulogu pri formiranju dinamičkog upravljanja, a u nastavku će biti prikazani osnovni tipovi dinamičkih sekvenci koje se koriste kao pobude prilikom identifikacije nelinearnih sistema.

4.2.1. Nasumične dinamičke sekvence

Osnovnu kategoriju nasumičnih dinamičkih sekvenci predstavljaju nasumične binarne sekvence (u daljem tekstu NBS, eng.: *RBS - Random Binary Sequence*) ili pseudo nasumične binarne sekvence (u daljem tekstu PNBS, eng.: *PRBS - Pseudo Random Binary Sequence*) koje karakteriše promena upravljačke veličine na dva diskretna nivoa u nasumičnim vremenskim intervalima. Ovakav tip sekvence može da se koristi pri identifikaciji linearnih dinamičkih sistema [95]. Sledeća, viša kategorija dinamičkih sekvenci se zasniva na NBS, a karakteriše ih nasumična amplitudna modulacija, odnosno za nasumične vremenske trenutke posmatrane NBS, formira se nova nasumična vrednost amplitude koja se zadržava do sledeće prelazne pojave, čime se dobijaju amplitudno modulirane nasumične binarne sekvence (u daljem tekstu

ANBS, eng.: *ARBS - Amplitude modulated Random Binary Sequence*), odnosno amplitudno modulirane pseudo nasumične binarne sekvence (u daljem tekstu APNBS, eng.: *APRBS - Amplitude modulated Pseudo Random Binary Sequence*).

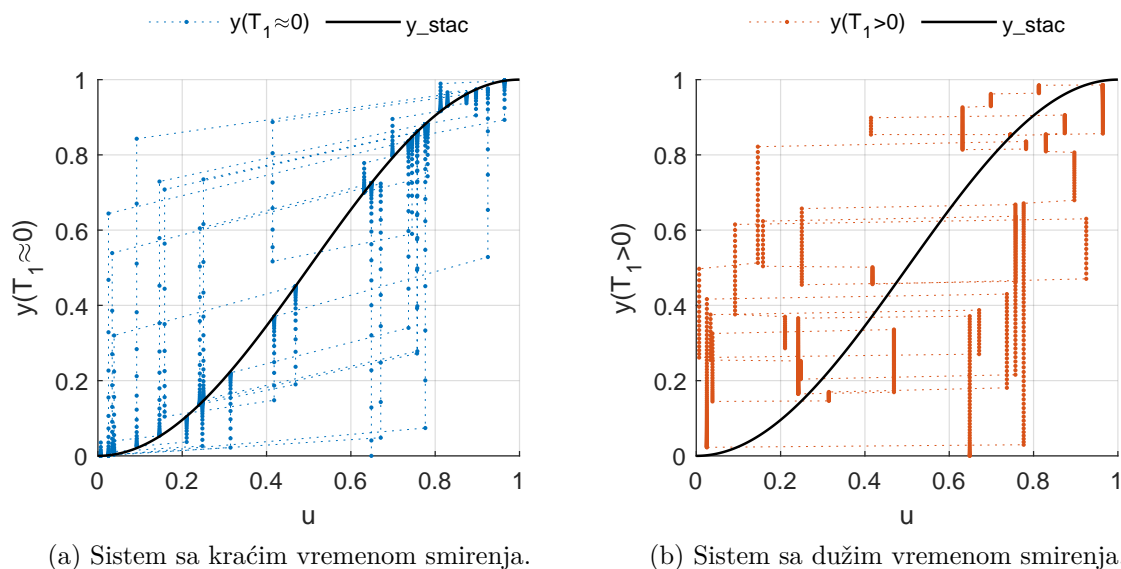
Amplitudno modulirane nasumične sekvence se upotrebljavaju prilikom identifikacije nelinearnih sistema [43]. Osnovna ograničenja koja se postavljaju pri definisanju APNBS je minimalno i maksimalno dozvoljeno trajanje pojedinačnih zadržavanja upravljačkog parametra na konstantnom nivou i željeni broj promena tokom perioda izvršavanja eksperimenta. Primer jedne APNBS je prikazan na slici 4.6. Pored promene upravljačke veličine, prikazani su odzivi dva nelinearna sistema prvog reda sa različitim koeficijentima uz q^{-1} članove, što može da se okarakterise kao različito vreme smirivanja prelazne funkcije na datu pobudu. Više detalja o razlikama između sistema sa višom, odnosno nižom vrednosti vremenske konstante T_1 , biće dato u poglavlju 6.1.



Slika 4.6.: Amplitudno modulirana nasumična binarna sekvenca i odzivi različitih nelinearnih sistema.

Stacionarna aproksimacija navedenih primera nelinearnih sistema prikazana je na slikama 4.7a i 4.7b. Za sistem koji karakteriše kraće vreme smirivanja (brži sistem), primećuje se grupisanje tačaka u okolini stacionarnog odziva. Tačke predstavljaju ekvidistantno uzorkovanje u vremenskom domenu, a veća gustina tačaka predstavlja veće približavanje stacionarnom radnom režimu. Ukoliko je sistem relativno brz ili trajanje jedne tranzicije APNBS dovoljno dugačko, ovakav tip dinamičkog ispitivanja bi se sveo na ispitivanje niza stacionarnih radnih režima. Sa druge strane, ukoliko se posmatra stacionarna aproksimacija sistema dužeg vremena smirenja, odnosno odabir sekvence kod koje su zadržavanja upravljanja na konstantnom nivou nedovoljno dugačka, amplitudna pokrivenost odziva je lošija, što predstavlja jedan

od nedostataka amplitudno moduliranih nasumičnih sekvenci. Preporučeno zadržavanje na konstantnom nivou treba da bude reda veličine $t = 1\tau$, odnosno vrednost jedne vremenske konstante posmatranog sistema [96].



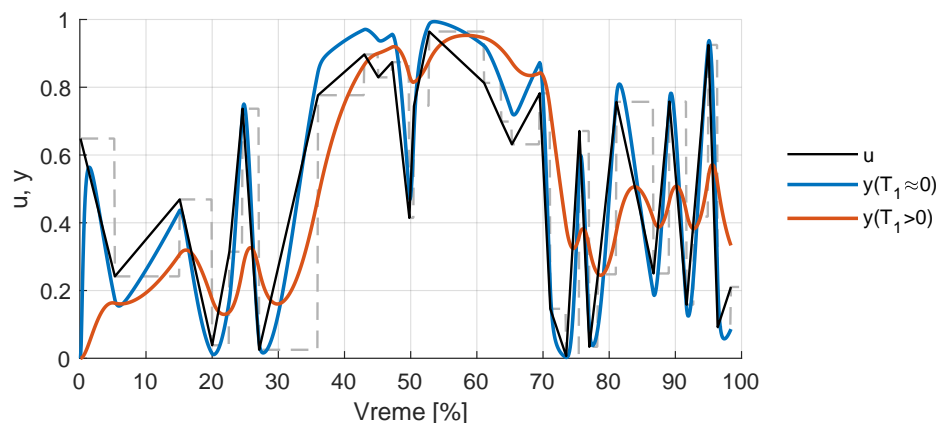
Slika 4.7.: Stacionarna aproksimacija odziva sistema u funkciji upravljačke veličine varirane po metodi APNBS.

Razvojem APNBS u Furijeov red, i prikazivanjem sekvence u frekventnom domenu, uočava se zastupljenost svih harmonika, ali i opadanje vrednosti amplituda za više harmonike. Za dinamičke sekvence se takođe definiše takozvano dinamičko polje, odnosno dijagram promene ulazne veličine na domenu $u(k) : u(k-1)$ [16]. Zahvaljujući stepenastoj promeni upravljačkog signala, pokrivenost dinamičkog polja posmatrane sekvence je relativno dobra sa aspekta realizovanih amplitudnih vrednosti, ali i loša sa aspekta zadržavanja na režimima tokom kojih je promena različita od nule ($\frac{du}{dt} \neq 0$). Pri generisanju APNBS ne postoji mogućnost odabira opsega frekvenci kojima će sistem biti pobuđivan, što iz bezbednosnih razloga predstavlja najveći nedostatak ovakvog tipa dinamičke sekvence i njenu ograničenu primenu pri ispitivanju motora SUS.

4.2.2. Nagibne funkcije

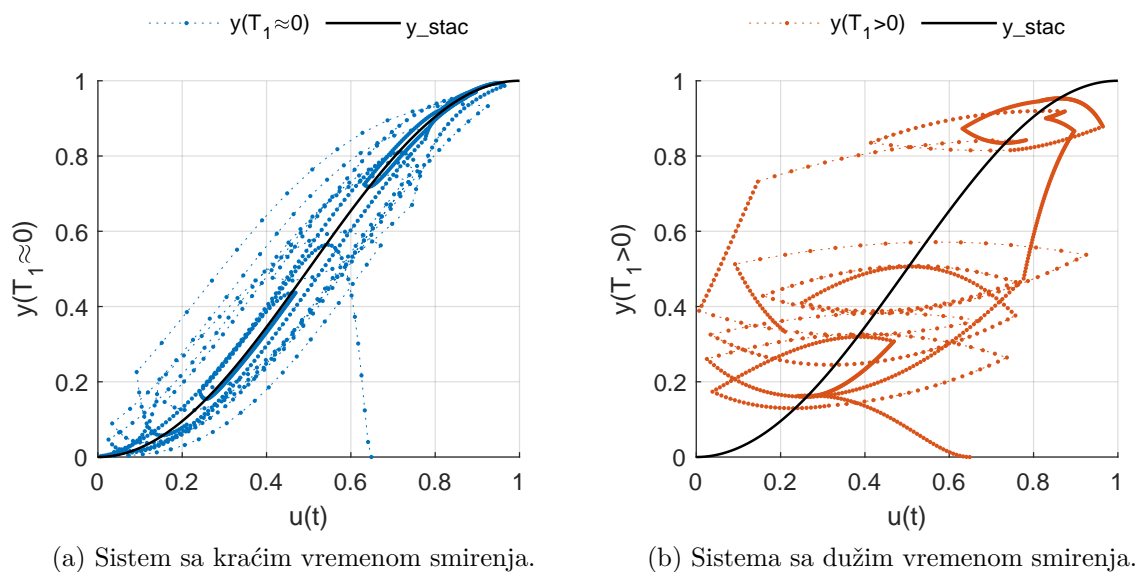
Bolja pokrivenost dinamičkog polja $u(k) : u(k-1)$ se dobija kada se umesto APNBS, diskretne vrednosti i trenuci promene radnih režima povežu nagibnim funkcijama, tj. rampama. Primer dinamičke pobude nagibnim funkcijama je prikazan na

slici 4.8. Ovde, kao i u nastavku, prikazan je odziv nelinearnog sistema identičnog kao i u poglavlju 4.2.1. Treba napomenuti da se nelinearnost odziva odražava samo kroz nelinearnu stacionarnu karakteristiku, dok su koeficijenti uz član q^{-1} konstantni. Kompleksniji vid nelinearnog sistema podrazumevao bi funkcionalnu zavisnost uz članove q^{-1} , ali za potrebe analize sekvenci koje se koriste kao pobuda, razmatranje odziva kompleksnijeg sistema je suvišno.



Slika 4.8.: Pobuda nagibnim funkcijama i odzivi različitih nelinearnih sistema.

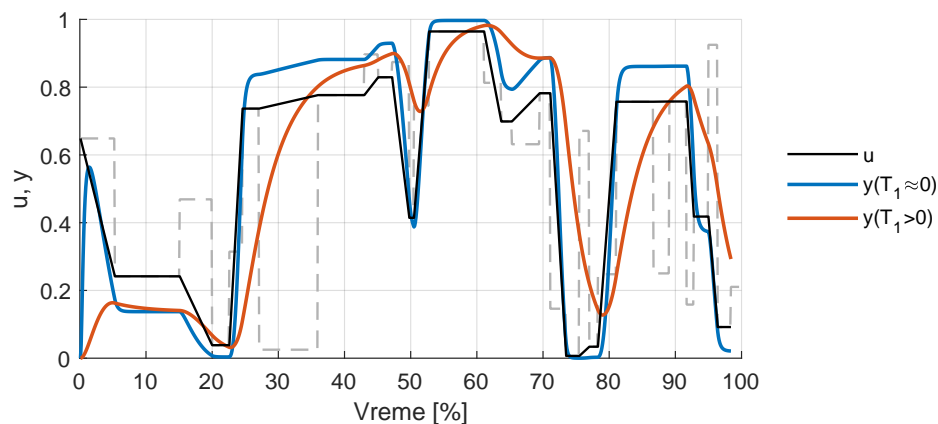
Stacionarna aproksimacija primera nelinearnog sistema na datu pobudu je prikazana na slikama 4.9a i 4.9b. Primećuje se manji otklon između izlazne veličine i stacionarne aproksimacije u poređenju sa rezultatima APNBS, što je posledica bolje pokrivenosti dinamičkog polja, odnosno blažih promena ulazne veličine. Analizom rezultata harmonijske analize ovakvog tipa dinamičke pobude uočava se načelno manja amplitudna zastupljenost harmonika više frekvence, ali nemogućnost odabira harmonika koji će činiti dinamičku sekvencu i u ovom slučaju predstavlja nedostatak. Na dijagramima stacionarne aproksimacije dinamičkog odziva, za delove dinamičke sekvence koje karakteriše niska vrednost gradijenta nagibne funkcije, uočava se relativno dobro poklapanje sa krivom stacionarnog odziva. Ova činjenica je iskorišćena prilikom formiranja plana ispitivanja sporim nagibnim funkcijama (SDN) što je osnovni deo praktičnog istraživanja prikazanog u ovom radu.



Slika 4.9.: Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog nasumičnim nagibnim funkcijama.

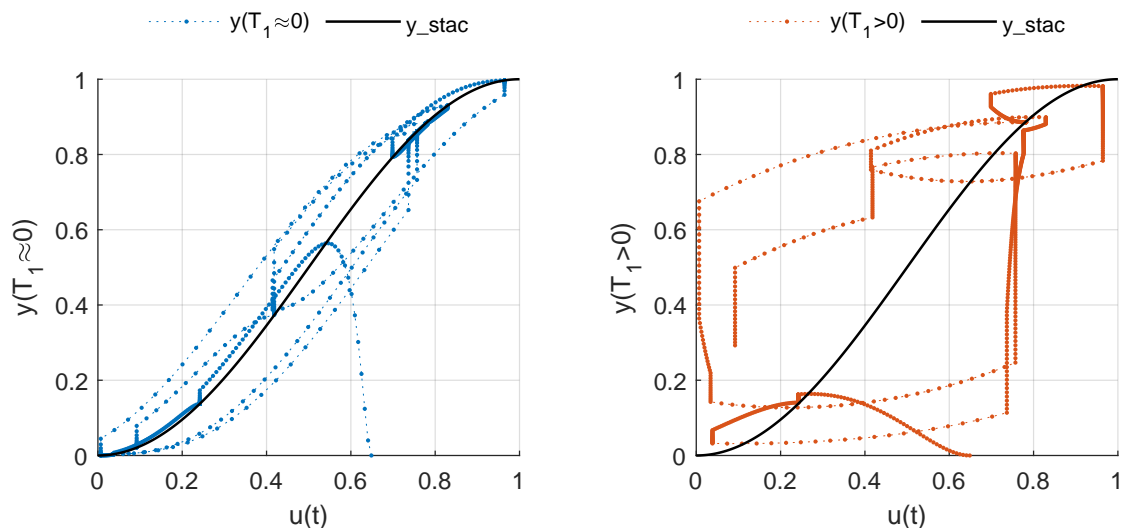
4.2.3. Nagibne funkcije sa zadržavanjem

Kombinovanjem prethodno opisanih dinamičkih sekvenci, dobijenih na osnovu APNBS, mogu da se formiraju takozvane nagibne pobude sa zadržavanjem. Kod ovog tipa dinamičke sekvence, jedna nasumična perioda APNBS služi kao osnova za određivanje nagibne funkcije, dok se tokom sledeće periode signal zadržava na konstantnom nivou. U iterativnom procesu se smenjuju nagibna funkcija i zadržavanje, čime se dobija upravljačka sekvenca prikazana na slici 4.10. Harmonijska analiza ovakvog tipa sekvenci ukazuje da su načelno zastupljene niže vrednosti amplituda harmonika više frekvence u poređenju sa APNBS ili čisto nagibnim funkcijama. Pokrivenost dinamičkog polja kod ovakvog tipa upravljačke sekvence u smislu dostizanja različitih amplitudnih nivoa je relativno loša zbog redukovano broja tranzijenata.



Slika 4.10.: Pobuda nagibnim funkcijama sa zadržavanjem i odzivi različitih nelinearnih sistema.

Povećano vreme zadržavanja ili razmatranje sistema koji poseduje brz odziv, može da dovede do realizacije niza stacionarnih režima. Pri praktičnoj realizaciji motorskih ispitivanja, promena upravljačkog parametra tokom stacionarnih ispitivanja poseduje sličan oblik, s tim što su periodi zadržavanja uslovljeni na drugačiji način. Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđenog nagibnim funkcijama sa zadržavanjem je prikazana na slikama 4.11a i 4.11b.



(a) Sistem sa kraćim vremenom smirenja.

(b) Sistem sa dužim vremenom smirenja.

Slika 4.11.: Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog nasumičnim nagibnim funkcijama sa zadržavanjem.

Primećuje se da je kao posledica dužeg zadržavanja, veća populaciju uzorkovanih

tačaka u oblasti bliskoj stacionarnoj aproksimaciji, a negativni efekti se ogledaju kroz lošiju amplitudnu zastupljenost ulazne veličine (zbog ograničenog trajanja eksperimenta i redukovano broja tranzijenata). Periode NBS i njihove amplitudne modulacije ne moraju da budu rezultat nasumičnog ili kvazi nasumičnog generatora, tako da se u praksi umesto njih koriste prednosti Holtonovih (ili Sobolovih) sekvenci za formiranje dinamičkih upravljačkih sekvenci. U literaturi se takve sekvence obično nazivaju Haltonove binarne sekvence ili Haltonove rampe.

4.2.4. Višestruke harmonijske funkcije

Za razliku od prethodno nabrojanih tipova dinamičkih sekvenci, višestruke harmonijske funkcije se formiraju na osnovu unapred definisanih amplituda harmonika željenih frekvenci (iz niza dostupnih frekvenci na osnovu trajanja sekvence i izabranog vremena uzorkovanja) primenom inverzne Furijeove transformacije [97]. U vremenskm domenu, višestruka harmonijska funkcija (eng.: *multisine*) je data relacijom:

$$u_{ms}(t) = \sum_{k=1}^{N_f} A_k \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (4.26)$$

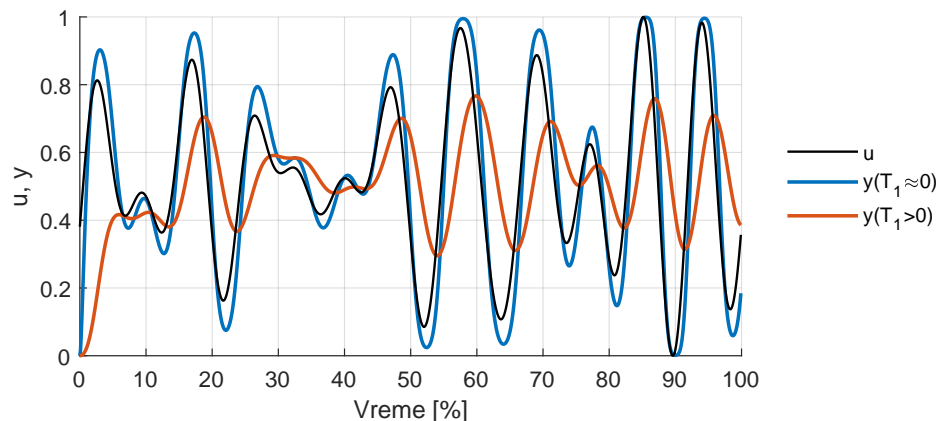
Inicijalno nasumični odabir faze θ_k , može biti optimizovan tako da odnos maksimalnog otklona i vrednost kvadratne sredine konačne sekvence bude minimalan [98] prema:

$$Cr(u) = \frac{u_{peak}}{u_{rms}} = \frac{\max |u(t)|}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}} \quad (4.27)$$

gde je T ukupno vreme trajanja sekvence. Minimizacijom faktora Cr (eng.: *Crest factor*), faze harmonika se tako biraju da DFT normalizovanog u_{ms} ima najveće vrednosti amplituda harmonika u frekventnom domenu. Pri formiranju višestruke harmonijske funkcije za analizu nelinearnih sistema treba voditi računa o izgledu amplitudne zastupljenosti harmonika, odnosno rezultatima DFT, jer previše niska vrednost faktora Cr dovodi do bipolarizacije amplitudne zastupljenosti, odnosno izolovanja dve dominantne frekvence koje čine u_{ms} .

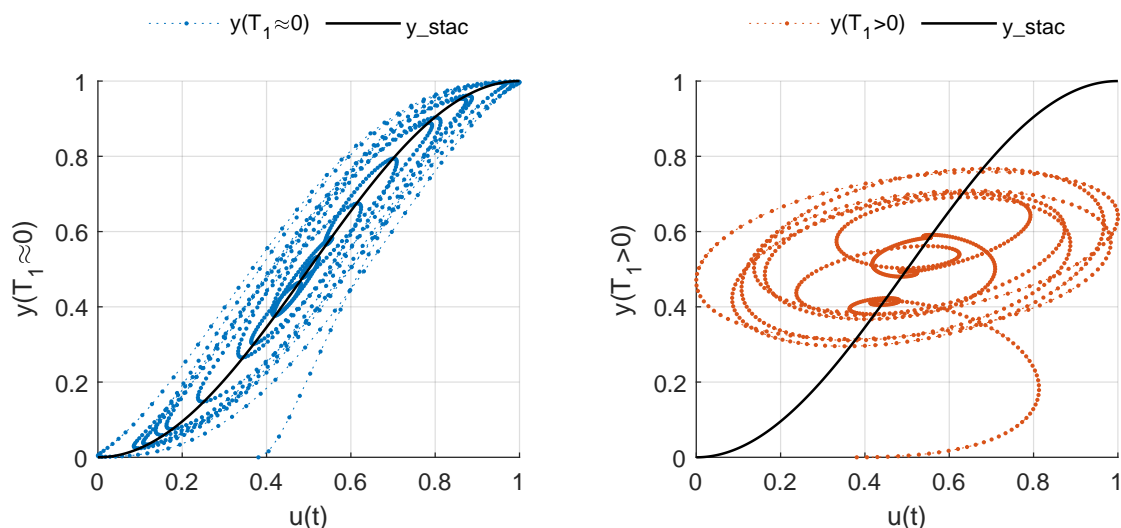
Na slici 4.12 je prikazana pobuda višestrukom harmonijskom funkcijom i odgovarajući odzivi nelinearnih sistema, koje karakteriše različito vreme smirenja. Pobude

sistema željenim spektrom frekvenci i signalom konačne vrednosti prvog izvoda značajno doprinose povećanju bezbednosti tokom ispitivanja realnog objekta, za razliku od APNBS ili nagibnih funkcija zasnovanih na APNBS [99].



Slika 4.12.: Pobuda višestrukom harmonijskom funkcijom i odzivi različitih nelinearnih sistema.

Iako su harmonici kojima se pobuđuje sistem pravilno izabrani, na dijagramima stacionarne aproksimacije 4.13a i 4.13b se primećuje nepovoljna amplitudna zastupljenost i grupisanje tačaka u centralnoj zoni opsega upravljačke veličine. Takođe, pokrivenost dinamičkog polja $u(k) : u(k-1)$ višestrukih harmonijskih funkcija je lošija u poređenju sa APNBS.



(a) Sistem sa kraćim vremenom smirenja.

(b) Sistem sa dužim vremenom smirenja.

Slika 4.13.: Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog višestrukim harmonijskim funkcijama.

4.2.5. Harmonijske funkcije promenljive frekvence

Kao što je napomenuto, pri ispitivanju realnih dinamičkih sistema, a posebno motora SUS, nagle promene upravljačkog parametra nisu povoljne i mogu da dovedu do oštećenja ispitivanog objekta ili merne opreme. Iz tog razloga, izučavaju se dinamičke sekvence koje karakteriše blaga (sporija, više glatka) promena upravljačkog parametra. U tu kategoriju spadaju harmonijske funkcije promenljive frekvence koje se u literaturi nazivaju klizajući signali (eng.: *Sweep Signal* ili *Chirp Signal*) [100], a odlikuju ih sledeće prednosti u odnosu na signale generisane putem APNBS:

- Pogodni su za variranje upravljačkog parametra prilikom ispitivanja motora SUS;
- Moguća pobuda unapred defnisanim frekventnim spektrom;
- Periodična priroda signala može da se upotrebi za eliminaciju uticaja mernog šuma;
- Niska vrednost odnosa Cr i dobra mogućnost skaliranja.

Postoji više načina kojima se definiše promena frekvence $f_i(t)$ upravljačkog signala u vremenskom domenu na intervalu $t = [t_0, t_1]$, a osnovna podela je na linearne, kvadratne i logaritamske klizajuće signale. Linearna promena frekvence može da se iskaže kao:

$$f_i(t) = f_0 + \beta_{(lin)}t \quad (4.28)$$

gde je koeficijent

$$\beta_{(lin)} = \frac{(f_1 - f_0)}{t_1} \quad (4.29)$$

definisano tako da bude ispunjen uslov vrednosti frekvence signala f_1 u krajnjem trenutku vremenskog domena t_1 . Analogno prethodnom izrazu, definiše se kvadratna promena frekvence signala kao:

$$f_i(t) = f_0 + \beta_{(sq)}t^2 \quad (4.30)$$

gde je

$$\beta_{(sq)} = \frac{(f_1 - f_0)}{t_1^2} \quad (4.31)$$

Pored početnih i krajnjih frekvenci koji odgovaraju vremnskim instancama t_0 i t_1 neophodno je definisanje oblika toka snage signala na spektrogamskom prikazu (konkavni ili konveksni oblik).

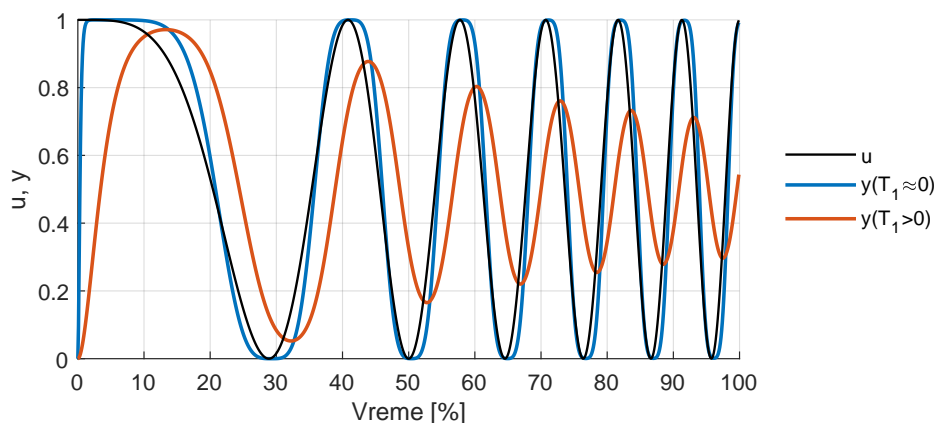
Logaritamska promena frekvence definiše se jednačinom:

$$f_i(t) = f_0 \times \beta_{(log)}^t \quad (4.32)$$

U ovom slučaju, neophodno je da vrednost minimalne frekvence ispunjava uslov $f_0 > 0$, a koeficijent $\beta_{(log)}$ se izražava kao:

$$\beta_{(log)} = \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{\frac{1}{t_1}} \quad (4.33)$$

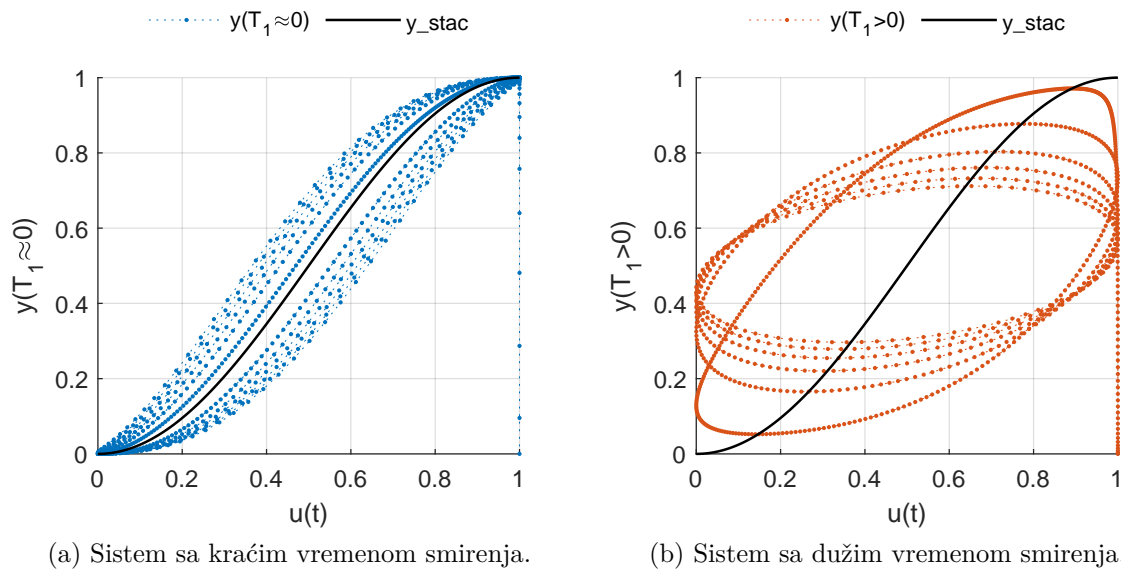
Na slici 4.14 je prikazana harmonijska funkcija sa linearnom promenom frekvence. Takođe, prikazani su i odzivi sistema korišćenih u prethodnim primerima. Ovakav primer pobude i odgovarajućeg odziva može da posluži kao osnova za pojašnjenje frekventne karakteristike sistema, odnosno iscrtavanje Bodeovog dijagrama, jer se jasno uočava promena amplitude i faze odziva sa promenom frekvence pobude.



Slika 4.14.: Harmonijska funkcija promenljive frekvence i odzivi različitih nelinearnih sistema.

Stacionarna aproksimacija, odnosno prikaz odziva sistema u funkciji pobude prikazana je na slikama 4.15a i 4.15b. Posledica variranja upravljačke veličine između konstantnih amplitudnih vrednosti, daće dobru pokrivenost dinamičkog polja

$u(k) : u(k-1)$ u pogledu otklona tačaka od glavne dijagonale, ali će amplitudna zastupljenost diskretnih tačaka pobude biti relativno loša, odnosno pojaviće se grupisanje tačaka u oblastima koje odgovaraju amplitudnim vrednostima. Iz tog razloga se pimenjuju različite metode manipulacije i transformacije osnovnih klizajućih signala kako bi se njihove karakteristike poboljšale i efikasnije iskoristile pri ispitivanju motora SUS [99, 43].



Slika 4.15.: Stacionarna aproksimacija odziva sistema pobuđivanog harmonijskom funkcijom promenljive frekvence.

Određivanje plana dinamičkog ispitivanja može da bude sastavni deo direktne modelski zasnovane kalibracije upravljačkih parametara [101]. Tada se u zatvorenoj petlji proverava rasipanje parametara matematičkog modela (uglavnom lokalnih linearnih modela) i po potrebi sprovodi novo dinamičko ispitivanje u cilju poboljšanja konačnog modela. Treba napomenuti da su takve metode veoma napredne i zahtevaju visok nivo laboratorijske infrastrukture u svakom smislu. Nedostatak ovakvog pristupa optimizacije dinamičkog modela i optimizacije sekvence kojim se objekat pobuđuje je nemogućnost izmene strukture matematičkog modela. Drugim rečima, ukoliko bi se javila potreba za promenom strukture matematičkog modela, podaci prikupljeni do tog trenutka neće na optimalan način uticati na određivanje koeficijenata modela, i biće neophodno sprovesti nova merenja.

Svi navedeni primeri dinamičkih sekvenci odnose se na variranje jednog upravljačkog parametra. S obzirom na dimenzionalnost upravljanja motorom SUS, moguće

je sprovesti dinamički test simultanim variranjem više upravljačkih parametara. Takvi eksperimenti su najzahtevniji u smislu postavke dinamičkih granica sistema i određivanja strukture matematičkog modela. Kako bi dinamički eksperiment bio efikasniji, odnosno upravljačka sekvenca uspela da pobudi sistem u što širem području dinamičkog radnog polja, neophodno je izvršiti optimizaciju autokorelacije (eng.: *Autocorrelation*) upravljačke sekvence, odnosno optimizaciju unakrsne korelacije (eng.: *Cross-Correlation*) za slučaj većeg broja simultanih upravljačkih sekvenci. Autokorelacija predstavlja analizu sekvence u smislu pronalaženja delova koji se ponavljaju, a definisana je jednačinom:

$$R_{x_1x_1}(\tau) = \sum_{k=1}^N x_1(k) x_1(k + \tau) \quad (4.34)$$

odnosno za unakrsnu korelaciju dve posmatrane sekvence:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \sum_{k=1}^N x_1(k) x_2(k + \tau) \quad (4.35)$$

gde je k uzorak u vremenskom domenu i τ vrednost vremenskog cirkularnog smicanja. Karakteristike i analiza korelacionih parametara prevazilaze okvire ovog rada, ali dodane informacije se mogu pronaći u literaturi [102, 103]. Primer praktične optimizacije višestrukih dinamičkih sekvenci koje se koriste za ispitivanje motora SUS date su u radu [104].

Vozni ciklusi su tipični primeri višestrukih paralelnih dinamičkih upravljačkih sekvenci. Jedina je razlika u tome, što je kod voznih ciklusa tok upravljačke sekvence formiran na osnovu drugačijih kriterijuma, tj. nemaju za cilj optimalno pobuđivanje sistema u što širem spektru relevantnih frekvenci i amplituda, već su proistekli kao rezultat statističke analize stvarne upotrebe pogonskih sistema.

4.2.6. Vozni ciklusi

Vozni ciklusi se sastoje iz niza standardizovanih dinamičkih sekvenci tokom kojih se brzina, ubrzanje i promena stepena prenosa menjaju na unapred definisan način. Prvi vozni ciklusi datiraju još iz sedamdesetih godina prošlog veka i od tada se neprestano unapređuju i modifikuju kako bi verodostojnije predstavljali način eksploatacije pogonskih sistema vozila u realnim uslovima. Svi vozni ciklusi se izvode u strogo kontrolisanim uslovima definisanim zakonskom homologacionom regulativom.

U različitim delovima sveta ne važe identične regulative, pa stoga postoji više vrsta i generacija vozničkih ciklusa. Starije verzije vozničkih ciklusa kao što su NEDC u Evropi, JC08 u Japanu i FTP-75 u SAD, su u periodu od 2017. do 2019. zamenjeni ciklusom WLTC (eng.: *Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles*) ciklusom koji treba da objedini karakteristike prethodna tri i time postane univerzalan vozni ciklus.

Vozni ciklus NEDC se sastoji iz četiri segmenta koji simuliraju uslove gradske vožnje i jednog segmenta koji simulira vožnju na auto-putu. Prva četiri segmenta karakteriše mala brzina kretanja vozila, nisko opterećenje motora i niska temperatura izduvnih gasova, jer se test započinje sa pothlađenim motorom. Poslednji segment ciklusa karakterišu radni režimi višeg opterećenja. Ipak, ovakav ciklus ne reprezentuje realne uslove vožnje u svakodnevnoj upotrebi vozila u gradskom saobraćaju, posebno ako se uzme u obzir činjenica da prosečno ubrzanje od 0 – 100^{km/h} savremenih vozila iznosi oko 9 sekundi za razliku od 14 sekundi koliko je iznosilo osamdesetih godina.

Japanski vozni ciklus (JC08) dobro predstavlja gradske uslove vožnje, naročito u gustom saobraćaju, uključujući rad motora na praznom hodu i česta ubrzanja i usporenja vozila. Najveći nedostatak ovog tipa ciklusa je taj što na neadekvatan način simulira uslove eksploatacije vozila na auto-putu i međugradsku vožnju.

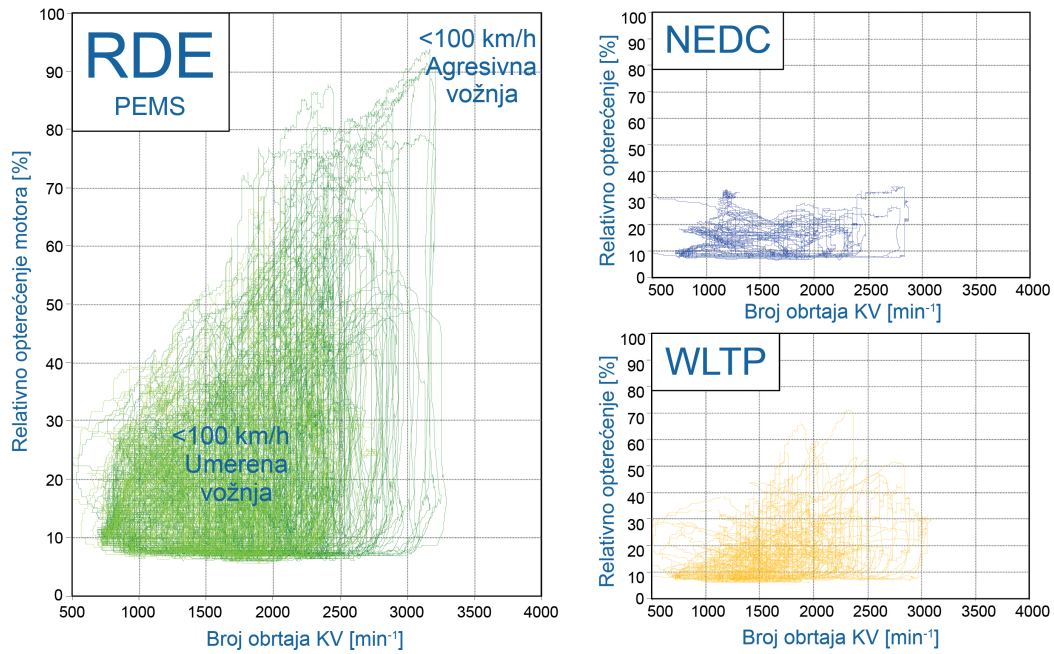
Vozni ciklus FTP-75 pokriva veći spektar uslova vožnje, nego JC08, ali ne pokriva sve realne uslove eksploatacije i predviđen je samo za ispitivanje parametara izduvne emisije motora. Dopuna ovog testa sadrži dodatne cikluse kako bi se izmerili parametri potrošnje i emisije tokom agresivne vožnje, vožnje na auto-putu i vožnje sa uključenim klima uređajem [105].

Imajući u vidu sve nedostatke prethodno navedenih ciklusa, 2015. godine, Ekonomska Komisija Ujedinjenih Nacija za Evropu (UNECE) definisala je ciklus WLTC. Primena ovog ciklusa zasniva se na doslednijoj zastupljenosti stvarnih uslova eksploatacije motornih vozila širom sveta. Vozni ciklus WLTC je deo procedure WLTP koja uslovljava proizvođače da izvrše kvalitetniju optimizaciju rada motora na prelaznim režimima tokom kojih, motor po prirodi strujno-termodinamičkih procesa, ima povećanu potrošnju goriva i pogoršanu izduvnu emisiju toksičnih komponenti. U tabeli 4.1 je dat pregled osnovnih karakteristika pomenutih vozničkih ciklusa.

Faza ciklusa	Trajanje ciklusa	Vreme praznog hoda	Pređeni put	Udeo praznog hoda	Maks. brzina	Maks. ubrzanje	Min. ubrzanje
	[s]	[s]	[km]	[%]	[m/s]	[m/s ²]	[m/s ²]
WLTC class 3, verzija 5.3							
niska	589	156	3.095	26.5	56.5	1.47	-1.47
srednja	433	48	4.756	11.1	76.6	1.57	-1.49
visoka	455	31	7.162	6.8	97.4	1.58	-1.49
veoma visoka	323	7	8.254	2.2	131.3	1.03	-1.21
ukupno	1800	242	23.266	13.4	/	/	/
FTP 75							
1	507	101	5.783	19.9	91.3	1.48	-1.48
2	862	165	6.215	19.1	55.2	1.48	-1.48
3	507	101	5.783	19.9	91.3	1.48	-1.48
ukupno	1876	367	17.780	19.6	/	/	/
NEDC							
gradska	780	252	4.058	32.3	50	1.04	-0.93
međugr.	400	41	6.955	10.3	120	0.83	-1.39
ukupno	1180	293	11.013	24.8	/	/	/
JC08							
1	651	129	5.322	19.8	62.6	1.53	-1.13
2	387	219	692	56.6	33.8	1.49	-1.04
3	166	9	2.158	5.4	81.6	1.17	-1.08
ukupno	1204	357	8.172	29.7	/	/	/

Tabela 4.1.: Osnovne karakteristike voznih ciklusa WLTC, FTP 75, NEDC, JC08 [105].

Veoma su aktuelna istraživanja na temu sastava i količine izduvnih gasova koje vozilo emituje tokom realne eksploatacije. Kategoriju testova emisije u realnim voznim uslovima (eng.: *RDE - Real Driving Emissions*) prati i ubrzan razvoj minijaturnih portabilnih analizatora (eng.: *PEMS - Portable Emission Measurement System*) i procedura koje će se u budućnosti sve više primenjivati pri ispitivanju vozila u realnim uslovima eksploatacije [106]. Tokom laboratorijskih ispitivanja novih pogonskih sistema, koriste se informacije o dinamičkim upravljačkim sekvencama baziranim na realnim voznim uslovima, čime se ubrzava razvoj novog proizvoda [107, 108]. Na slici 4.16 je prikazano poređenje zastupljenosti radnog režima motora tokom izvođenja NEDC, WLTP i testa izduvne emisije u realnim uslovima vožnje.

ENGINE SPEED / LOAD DISTRIBUTION
EXAMPLES OF REAL WORLD DRIVING VS. TEST

Slika 4.16.: Poređenje zastupljenosti radnog režima motora za testove NEDC, WLTP i RDE [109].

5. Sistemi ispitnog stola za stacionarno i dinamičko ispitivanje motora

Ispitni sto za ispitivanje motora se sastoji od više podsistema, a potreban nivo kompleksnosti instalacije zavisi od zahteva koji se postavljaju prilikom definisanja eksperimenta. U opštem slučaju, osnovni elementi ovakve instalacije su motor i apsorpcioni dinamometar, tj. motorska kočnica. Postoji nekoliko tipova motorskih kočnica, a razlikuju se po načinu rada, nivou snage koje mogu da apsorbuju, odnosno minimalnom i maksimalnom momentu kočenja, nivou dozvoljenog brzinskog opterećenja i slično. Od vrste motorske kočnice zavisi i kakvog će tipa, mogućnosti i performansi biti njen pripadajući upravljački sistem, a osnovna podela je na hidraulične i električne kočnice [65].

Električne kočnice su savremenije od hidrauličkih i odlikuje ih preciznija regulacija, mogućnost startovanja motora pomoću kočnice i mogućnost motoriranja motora. Dalja podela na električne kočnice sa vihornim strujama, jednosmernom i naizmennom strujom otvara mogućnost za regenerativno kočenje, odnosno transformaciju mehaničke u električnu energiju što ima pozitivan efekat na ekonomičnost procesa ispitivanja motora. Za određene aplikacije, hidraulične kočnice predstavljaju jedino praktično rešenje, a to je uglavnom uslovljeno visokim vrednostima angažovane snage gde je robusnost i pouzdanost od primarnog značaja [110].

Najsavremenije i najzastupljenije motorske kočnice koje se koriste pri prototipskim, naučno-istraživačkim i specijalnim ispitivanjima vozilskih motora su električne kočnice koje poseduju asinhronu mašinu i konverterske module za generisanje frekventno modulisanog toka naizmennične struje uz mogućnost regenerativnog kočenja. Ovakav tip kočnica, pored stacionarnog ispitivanja motora omogućava i sprovođenje precizno kontrolisanih dinamičkih testova i iz tog razloga se nazivaju „dinamičke

kočnice”. Sastavni deo korišćene eksperimentalne instalacije je dinamička kočnica proizvođača Rotronics karakteristika datih u tabeli 5.1.

Proizvođač	Rotronics
Model	Dynosens
Maksimalni broj obrtaja	10000 min ⁻¹
Maksimalni moment kočenja	720 Nm pri 540 min ⁻¹ ; 4200 min ⁻¹
Maksimalna snaga kočenja	300 kW pri 9200 min ⁻¹
Mogućnost promene smeru rotacije	da
Asinhroni elektromotor	SCHORCH LN8280M-A
Oznaka kontrolnog modula	PGB301
Sigurnosni modul	integriran u sistem upravljanja
Oznaka modula linearnog aktuatora	CEA301

Tabela 5.1.: Karakteristike motorske kočnice.

Za potrebe istraživanja, na probni sto je postavljen četvorocilindarski, vozilski, turbonatpunjeni, dizel-motor čije su osnovne karakteristike date u tabeli 5.2.

Proizvođač	PSA grupa
Model	DV4TD
Ugrađivan u vozilo	Citroën C1 1.4 HDI
Maksimalna deklarirana snaga	40 kW pri 4000 min ⁻¹
Maksimalni obrtni moment:	130 Nm pri 1750 min ⁻¹
Turbokompresor	BorgWarner KP35 (3K-BW)
Međuhlađenje	ne
Sistem za napajanje gorivom	Direktno ubrizgavanje (<i>Common Rail</i>)
Broj cilindara i redosled ubrizgavanja	4, 1-3-4-2
Prečnik klipa	73.7 mm
Hod klipa	82.0 mm
Ukupna radna zapremina	1398 mm ³
Geometrijski stepen sabijanja	18:1
Upravljačka jedinica	SIEMENS 8HT
Emisiona klasa	EURO 3

Tabela 5.2.: Osnovni podaci o ispitivanom motoru.

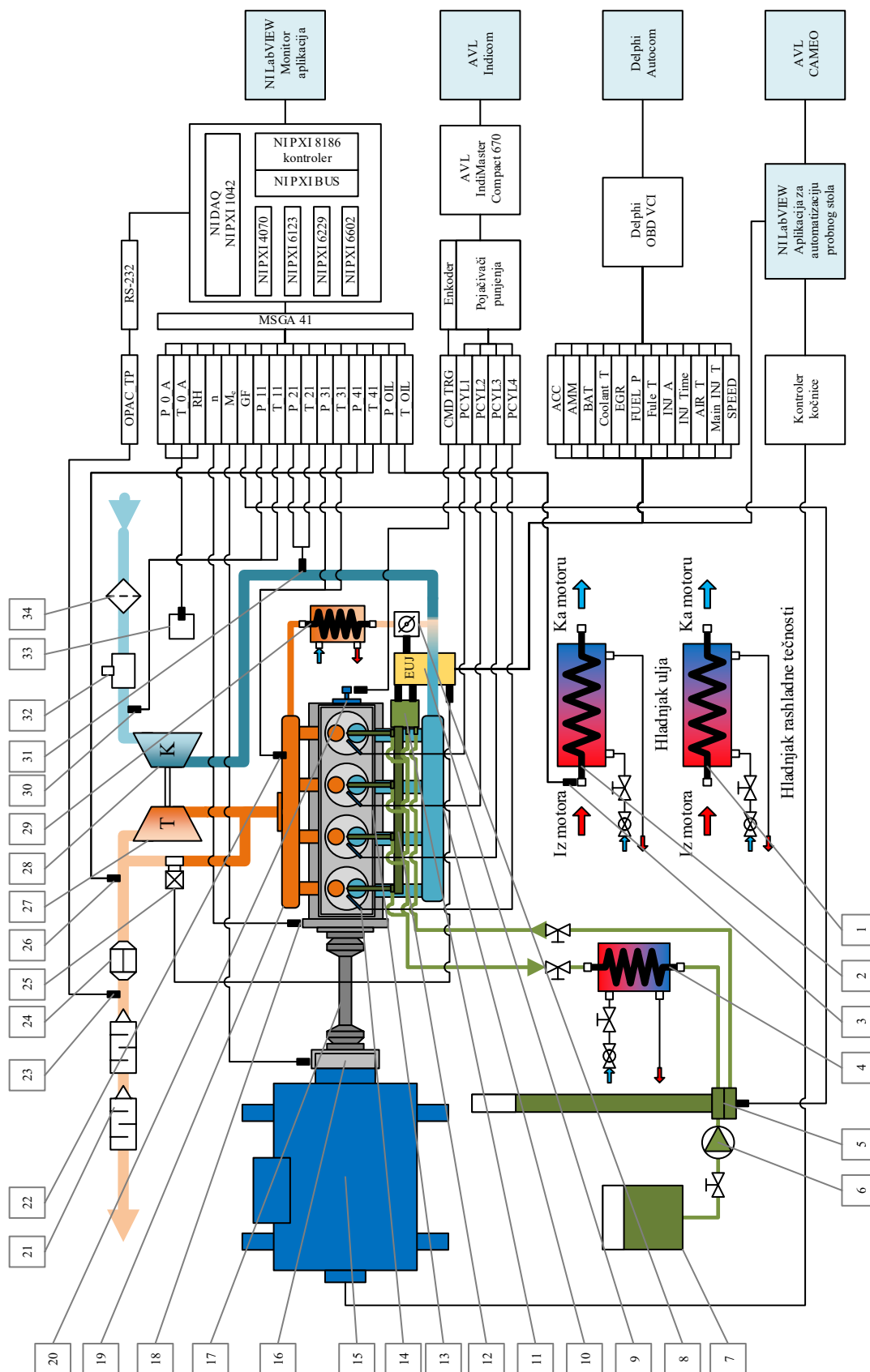
Osnovno ograničenje instalacije ogleda se u upotrebi serijske upravljačke jedinice motora čiji softver ne omogućava direktan pristup upravljačkim veličinama i

kalibracionim parametrima. Iz tog razloga nije postojala mogućnost promene pojedinih upravljačkih parametara tokom rada motora, kao što su na primer parametri ubrizgavanja goriva (eksplicitno zadata željena ubrizgana količina goriva, pritisak ubrizgavanja, ugaoni položaj početka ubrizgavanja i slično). Jedini upravljački parametar koji je bio dostupan je željeni nivo opterećenja motora, a ta informacija je posredstvom algoritma upravljačke jedinice i predefinisanih upravljačkih mapa iskorišćena za upravljanje aktuatorima predmetnog motora.

Upravljačka jedinica motora ima mogućnost povezivanja sa dijagnostičkim uređajem posredstvom odgovarajućeg OBD-II komunikacijskog protokola definisanog standardom SAE J1979 [111]. Za tu namenu upotrebljen je multifunkcionalni VCI (eng.: *Vehicle Communication Interface*) uređaj i prateći softver proizvođača Delphi [112]. Pored informacija o eventualnoj grešci i mogućnosti permanentnog ili privremenog brisanja greške, određene informacije, čiji je spisak dat u tabeli A.1, su prikupljane u kontrolne svrhe. Uvid u parametre upravljačke jedinice motora je veoma značajan prilikom rada na probnom stolu, jer se na taj način, motor i ostatak instalacije pravovremeno štiti prilikom dostizanja neregularnih ili potencijalno opasnih radnih režima. Kao što je napomenuto, podaci prikupljeni posredstvom dijagnostičkog interfejsa su informativnog tipa jer ih karakterišu sledeća ograničenja:

- Koriste se senzori koji su sastavni deo fabričke električne instalacije motora, tako da karakteristike i tačna prenosna funkcija senzora nisu poznati, već su te informacije implementirane u kôd EUJ motora;
- Brzina pristizanja informacija je uslovljena brzinom ostvarene veze (K-line, L-line, CAN) i brzinom konverzije na serijski adapter korišćenog računara;
- Različite promenljive imaju različite prioritete na mreži tako da brzina uzorkovanja pojedinih kanala varira;
- Brzina osvežavanja u aplikativnom softveru za prikaz OBD II poruka je uslovljena arhitekturom aplikacije i operativnim sistemom korišćenog računara;
- Moguće je prikupiti samo približne informacije o radnim parametrima i to samo na stacionarnim režimima rada.

Šematski prikaz instalacije koji se odnosi na dispoziciju osnovnih elemenata ispitnog stola sa naznačenim pozicijama ugrađenih senzora je dat na slici 5.1. U tabelama 5.3, A.3 i A.4 je dat opis mernih mesta, korišćenih senzora i osnovnih elemenata eksperimentalne instalacije.



Slika 5.1.: Šema laboratorijske instalacije.

Oznaka	Opis pozicije
P_{0_A}	Apsolutni pritisak okoline
T_{0_A}	Temperatura okoline
RH	Relativna vlažnost okoline
n	Broj obrtaja motora
M_e	Moment kočenja motora
GF	Maseni protok goriva
P_{11}	Apsolutni pritisak na ulaznom preseku kompresora
T_{11}	Temperatura na ulaznom preseku kompresora
P_{21}	Apsolutni pritisak na izlaznom preseku kompresora
T_{21}	Temperatura na izlaznom preseku kompresora
P_{31}	Apsolutni pritisak na ulaznom preseku turbine
T_{31}	Temperatura na ulaznom preseku turbine
P_{41}	Apsolutni pritisak na izlaznom preseku turbine
T_{41}	Temperatura na izlaznom preseku turbine
P_{OIL}	Apsolutni pritisak u glavnoj uljnoj magistrali
T_{OIL}	Temperatura ulja
$OPAC_TP$	Dimnost izduvnih gasova

Tabela 5.3.: Pregled oznaka fizičkih veličina merenih u vremenskom domenu.

Pored navedenog, ispitni sto je opremljen i brojnim dodatnim sistemima, kojima je zadovoljena predviđena funkcionalnost za dato istraživanje. Određene fizičke veličine su praćene u vremenskom domenu posredstvom uređaja za analognu i digitalnu akviziciju (eng.: *DAQ - Data Acquisition*). Karakteristike korišćene opreme i osnovna arhitektura aplikacije biće dati u poglavlju 5.1.

Pored veličina praćenih u vremenskom domenu, značajnu ulogu pri analizi radnog procesa motora ima praćenje veličina u ugaonom domenu, odnosno u funkciji ugla kolenastog vratila motora. U tom smislu, opis korišćenog sistema za indiciranje motora biće dat u poglavlju 5.2.

S obzirom na to da je predmet istraživanja i dinamičko ispitivanje motora SUS, u poglavlju 5.3 biće prikazani osnovni zahtevi, korišćeni programski paketi i arhitektura aplikacije za dinamičko upravljanje motorom i motorskom kočnicom.

5.1. Akvizicija podataka u vremenskom domenu

Osnovu sistema za prikupljanje podataka u vremenskom domenu čini modularna hardverska PXI (eng.: *PCI eXtensions for Instrumentation*) platforma proizvođača *National Instruments* (NI) i odgovarajuća aplikacija za kontrolu akvizicije kreirana u okviru *NI LabVIEW* programskog okruženja. Proširenje PCI magistrale realizovano je unutar kućišta NI PXI-1042 [113] koje sadrži PC kontroler NI PXI-8186 [114] i kartice za proširenje, odnosno povezivanje sa laboratorijskim periferijama. Spisak korišćenih kartica sa opisom dat je u tabeli A.2.

Multifunkcionalne akvizicione kartice NI PXI 6229M i NI PXI 6123S upotrebljene su za merenje osnovnih radnih parametara motora. Temperature hladnog spoja (kompenzacija hladnog spoja termoparova) i temperatura spoljne sredine merene su pomoću referentnog digitalnog multifunkcionalnog multimetra NI PXI 4071 sa stabilisanom strujnom ekscitacijom senzora. Za kondicioniranje naponskih signala sa piezorezistivnih senzora pritiska, termootpornih senzora temperature, termistora i termoparova u smislu napajanja i pojačanja, korišćen je set 4-kanalnih pojačivača MSGA-41 [115]. Merenje časovne potrošnje goriva, odnosno masenog protoka goriva, izvršeno je specijalnim sistemom za tu namenu svojevremeno razvijenim i napravljenim na Katedri za motore, Univerziteta u Beogradu. Ovaj sistem nosi oznaku FCMS-3000 [116], a princip merenja se zasniva na merenju promene hidrostatičkog pritiska stuba goriva unutar merene birete. Rezultati merenja masenog protoka goriva gravimetrijskom metodom ne zavise od trenutne vrednosti temperature goriva ili temperaturske dilatacije merne birete, što je izuzetno povoljno sa aspekta tačnosti merenja. Tokom laboratorijskog ispitivanja motora, termički nivo goriva se u načelu menja zbog promenljivog termičkog nivoa motora i promenljivog protoka goriva ka motoru i na povratnom vodu pumpe visokog pritiska i brizgača. Instalacija je opremljena sistemom za hlađenje goriva, ali bez kontrole u zatvorenoj petlji. Ovaj nedostatak može da se nadomesti ugradnjom sistema za kondicioniranje temperature goriva, kao što je AVL 735 [117], ali za vreme ispitivanja uređaj ovog tipa nije bio dostupan.

Tokom ispitivanja, obavezno se mere termodinamički parametri spoljne sredine, odnosno okolnog usisnog vazduha u smislu temperature, apsolutnog pritiska i relativne vlažnosti. Posredstvom ovih informacija, izmereni efektivni obrtni moment motora se svodi na korigovane vrednosti propisane standardom ISO 15550 [118].

Uređaj za merenje dimnosti izduvnih gasova, AVL 439 [119], takođe je korišćen za vreme ispitivanja, a osnovne specifikacije date su u tabeli A.5. Princip rada opacime-

tra se zasniva na merenju slabljenja intenziteta svetlosti između foto-emitera i foto-prijemnika unutar merne komore određene dužine izrađene od nereflektujućeg materijala koja je homogeno ispunjena izduvnim gasom. Primenom Beer-Lambertovog (Beer-Lambert) zakona, dolazi se do informacije o procentualnoj dimnosti izduvnog gasa, odnosno koeficijenta apsorpcije svetlosti k , izraženog po jedinici dužine merne komore.

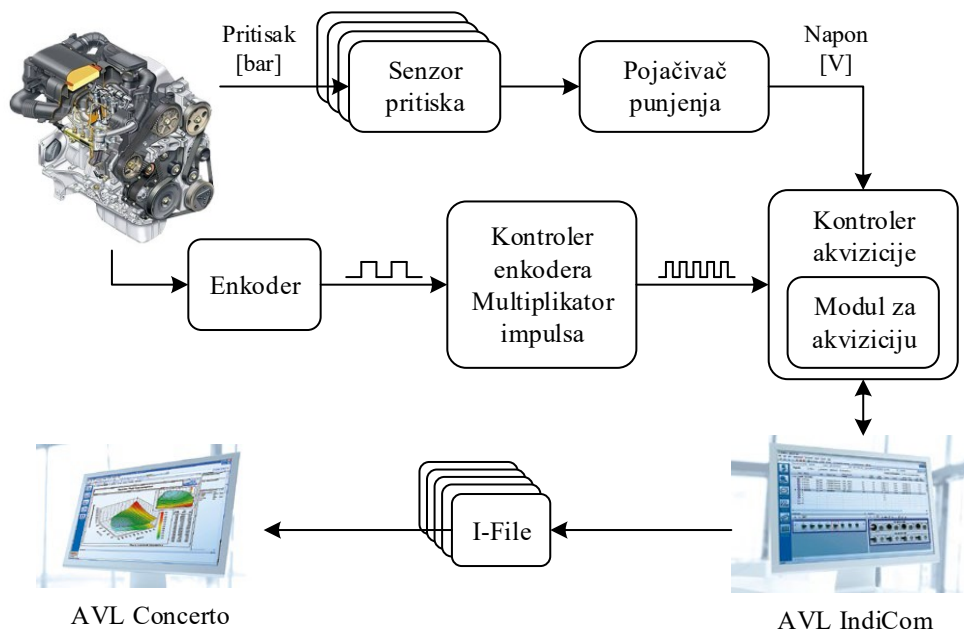
Osnovna arhitektura LabVIEW aplikacije za prikaz i snimanje podataka u vremenskom domenu zasniva se na sledećim funkcionalnim celinama:

- Inicijalizacija hardvera;
- Konfiguracija akvizicionih kartica i kanala;
- Podešavanje brzine uzorkovanja;
- Primena prenosnih funkcija i filtriranje signala;
- Prikaz podataka u petlji uslovljenoj signalom za prekid rada ili pojavom greške;
- Smeštanje podataka u binarnu TDMS datoteku pokretanjem komande za snimanje podataka;
- Zatvaranje datoteke sa snimljenim podacima;
- Oslobođanje hardverskih resursa prekidom izvršavanja aplikacije, odnosno glavne petlje.

5.2. Indiciranje motora SUS

Praćenje i beleženje toka pritiska u cilindru motora tokom odvijanja radnog ciklusa, predstavlja ključni izvor podataka za izvođenje analiza sa ciljem unapređenja radnog procesa motora SUS. Prvi uređaji za ovu namenu posedovali su prenosni mehanizam između klipa i elemenata za iscertavanje toka pritiska u cilindru kako bi mogao da se formira karakteristični p - V dijagram. Oprema koja se danas koristi u laboratorijama širom sveta, je zasnovana na konceptu koji će biti opisan u nastavku, a više detalja se može pronaći u literaturi [120]. Naziv „indiciranje” odnosio se na merenje toka pritiska u cilindru, a danas predstavlja sinonim za praćenje brojnih veličina u ugaonom domenu motora SUS.

Prikupljanje podataka tokom indiciranja motora razlikuje se od prikupljanja podataka u vremenskom domenu, prvenstveno zbog načina pokretanja (triggerovanja) uzorkovanja koje je uslovljeno signalima sa inkrementalnog enkodera postavljenog na prednji kraj kolenastog vratila. Funkcionalna šema indiciranja pritiska u cilindru motora je data na slici 5.2.



Slika 5.2.: Funkcionalna šema indiciranja pritiska u cilindru motora.

Na motor je postavljen inkrementalni enkoder AVL 3064Z01 [121], tehničkih karakteristika datih u tabeli A.6, podešen na osnovnu rezoluciju od 1° kolenastog vratila, odnosno 360 impulsa po obrtaju. Nakon detektovanja uzlazne ivice signala sa enkodera, pokreće se uzorkovanje na akvizicionim karticama AVL ADC4+ koje su sastavni deo multifunkcionalne akvizicione platforme AVL Indimaster Compact 670 [122], projektovane za motorska ispitivanja. Sprega signala sa enkodera i akvizicionih modula ostvaruje se unutar kontrolera akvizicije AVL Control Unit 6708, čiji se deo procesorske snage koristi za izračunavanja indikatorskih parametara datog radnog režima u realnom vremenu, odnosno odmah po obavljenom radnom ciklusu. Osnovne tehničke karakteristike akvizicione platforme su date u tabeli A.7.

Pozicioniranje senzora za indiciranje pritiska u cilindru, odnosno komori za sagorevanje, uglavnom predstavlja svojevrsan izazov. Cilindarska glava je po svojoj konstrukciji vrlo složen deo motora, a pri postavljanju senzora se izbegava sledeće:

- Značajno narušavanje geometrije komore za sagorevanje;

- Zone pogona i elemenata sistema razvoda radne materije (usisni i izduni kanali, sedišta ventila);
- Zona oko elemenata za formiranje smeše i paljenje (svećica, brizgač, predkomora);
- Prostor kroz koji struji rashladna tečnost motora;
- Uljni prostor u smislu dopremanja i odvođenja motornog ulja.

Ispitivani motor poseduje elektrootporne grejače u komori za sagorevanje koji obezbeđuju pouzdano startovanje pothlađenog motora. S obzirom na to da je motor sastavi deo laboratorijske instalacije i da hladan start ne predstavlja problem, tehnološki otvori za grejače predstavljaju optimalno mesto za ugradnju senzora pritiska uz minimalnu prepravku cilindarske glave. Pritisak je indiciran na svim cilindrima posredstvom AVL GM12D piezoelektričnih senzora [123] osnovnih karakteristika datih u tabeli A.8. Piezoelektrični senzori su pasivni senzori koji na svom izlazu daju određenu količinu naelektrisanja proporcionalnu naprezanju kristalne rešetke kvarcnog elementa senzora. Pojačivači punjenja su sastavni deo mernog lanca i pretvaraju signal sa senzora u naponski signal opsega korišćene akvizicione platforme. U tom smislu, određuje se adekvatan opseg pojačivača punjenja kako bi se za predviđeni maksimalni pritisak ciklusa tokom merenja u što većoj meri pokrio opseg A/D konvertora akvizicione kartice.

Tokom ispitivanja korišćeno je više različitih generacija pojačivača punjenja. Za stacionarna ispitivanja iskorišćena je starija generacija dvokanalnih pojačivača AVL 3066-A01 [124] karakteristika datih u tabeli A.9. Osnovni nedostatak pojačivača punjenja je vremensko klizanje pojačanog signala u funkciji osetljivosti, odnosno podešenog opsega. Ukoliko je promena merene fizičke veličine relativno brza, poželjna je veća osetljivost pojačivača punjenja kako bi se dinamika procesa što pravilnije ispratila, ali pri takvom podešavanju je intenzivnije klizanje pojačanog signala. Pasivna elektronika implementirana u pomenute pojačivače je projektovana tako da kompenzuje klizanje izlaznog naponskog nivoa, ali pri ustaljenoj frekvenci i amplitudi pobude senzora. Iz tog razloga se preporučuje upotreba ovakvih uređaja pri stacionarnim ispitivanjima motora. Za dinamička ispitivanja upotrebljen je četvorokanalni pojačivač punjenja novije generacije, AVL Micro IFEM 4P4G [125], karakteristika prikazanih u tabeli A.9, čiji je mikrokontroler zadužen za kompenzaciju ofseta i filtriranje signala u stacionarnim i dinamičkim uslovima rada motora.

Pristigli podaci sa akvizicionih kartica sistema za indiciranje se prosleđuju kontroleru akvizicije na kome se izvršava analiza podataka u realnom vremenu na RTP

modulu. Dobijeni rezultati se kontinualno prosleđuju operateru probnog stola u vidu karakterističnih ciklusnih veličina, ali slanje svih snimljenih podataka nije moguće zbog velike količine i ograničene brzine prenosa. Poseban deo memorije kontrolera akvizicije je rezervisan za određeni radni ciklus motora čiji će podaci biti u potpunosti prosleđeni korisničkom interfejsu, odnosno softverskom paketu AVL IndiCom [126] sa ciljem vizuelizacije merenih veličina. Nakon uspešnog prijema ovog seta podataka, rezervisana memorija se osvežava podacima najskorije realizovanog radnog ciklusa.

U okviru AVL IndiCom programskog paketa, moguće je definisanje brojnih proračuna nad merenim veličinama, posredstvom posebnog dela programa za grafičko i tekstualno programiranje (CalcGraf), ali osvežavanje i prikaz rezultata ostaće uslovljeni brzinom prenosa podataka između kontrolera akvizicije i korisničkog računara. U načelu, operateru probnog stola nisu potrebne sve informacije sa sistema za indiciranje u realnom vremenu, ali je bitno da podaci budu snimljeni kako bi se omogućila naknadna obrada podataka. Format skladištenja podataka definisan je industrijskim standardom i nosi oznaku AVL I-File. Otvaranje I-File datoteke, manipulacija podacima, vizuelizacija, sprovođenje termodinamičkih i drugih analiza realizuje se u okviru komercijalnog softvera AVL Concerto [127]. Postoje distribucije otvorenog kôda za učitavanje I-File datoteka, kao što je Matlab dodatak „catool” [128], ali pri generisanju struktura uočeni su određeni nedostaci. Tako na primer, informacija o ugaonom položaju SMT je zaokružena na celobrojnu vrednost, a analize pokazuju da greška do 1° kolenastog vratila pri određivanju SMT na pojedinim radnim režimima može da dovede do visoke vrednosti greške (od 10%) pri određivanju srednjeg indiciranog pritiska [129, 130].

Za vreme ispitivanja, na pojedinim radnim režimima indiciran je tok struje pobeude na brizgaču prvog cilindra i signal sa senzora pritiska u visokopritisnom akumulatoru goriva. Motor je opremljen brizgačima sa piezoelektričnim aktuatorima, tako da je analizom toka struje pri otvaranju i zatvaranju brizgača, izvršena provera informacija vezanih za pilot i glavno ubrizgavanje, očitanih sa dijagnostičkog terminala.

5.3. Aplikacija za automatizovano definisanje radnog režima motora

Laboratorijski sistemi za ispitivanje motora su veoma kompleksni, a proces ispitivanja modernih motora SUS bi bio praktično nemoguć da ne postoji određeni nivo automatizacije čitavog sistema. Do kog nivoa će instalacija biti automatizovana, zavisi od brojnih kompromisa koji su rezultat analize infrastrukturnih, vremenskih i finansijskih resursa. Automatizovano praćenje i prikazivanje merenih veličina pruža uvid u parametre rada instalacije uz mogućnost provere graničnih vrednosti, kao što su na primer, maksimalna dozvoljena temperatura izduvnih gasova ili dozvoljeni nivo detonacije u cilindru pri podešavanju radnog režima. Pored zaštite motora i merne opreme, praćenjem ostalih merenih veličina, moguće je pravovremeno detektovanje problema na instalaciji čime se izbegava potreba za ponavljanjem merenja. Automatizovano prikupljanje podataka u datoteke je odavno postalo standard pri ispitivanju motora. Na ovaj način je moguće izračunavanje statističkih parametara merenih veličina nad proizvoljnom populacijom podatka u smislu srednje vrednosti, srednjeg kvadrenog odstupanja, koeficijenta varijacije i slično. Ukoliko je plan ispitivanja obiman, što implicira dugotrajno ispitivanje, primenjuju se sistemi za automatizovano sprovođenje eksperimenta bez permanentnog nadzora operatera.

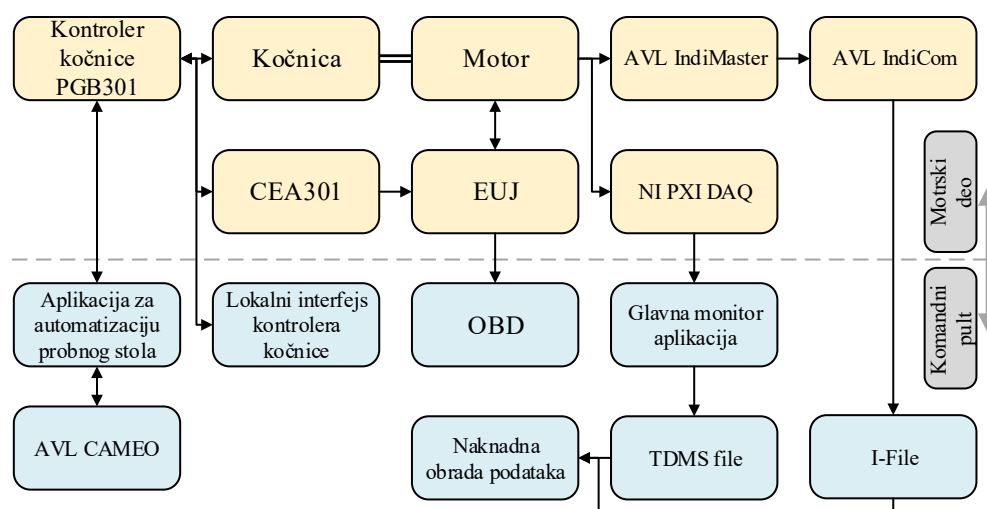
Najviši nivo automatizacije ispitnog stola za ispitivanje motora podrazumeva centralizovan nadzor i kontrolu svih podsistema. Komercijalno dostupna platforma AVL PUMA Open [131] inkorporira kontrolu motorske kočnice, kontrolu ostalih mernih uređaja uključujući sistem za određivanje sastava izduvnih gasova i analizu procesa sagorevanja indiciranjem motora, sprovođenje automatizovanih planova ispitivanja sa mogućnošću kalibracije upravljačkih parametara upravljačke jedinice. Upotreba i održavanje ovakve platforme zahteva izuzetne finansijske i inženjerske resurse i opravdana je u kompanijama svetske autoindustrije. Automatizovani planovi ispitivanja motora realizuju se primenom komercijalno dostupnih softvera za definisanje istih, a u konkretnom slučaju upotrebljen je softver AVL CAMEO [34]. Osnovna funkcionalnost AVL PUMA Open softvera u smislu komunikacije između AVL CAMEO softvera i kontrolera kočnice Rotronics PGB301, koji izvorno nema podršku i interfejs za AVL CAMEO, realizovana je u okviru NI LabVIEW programskog okruženja [132].

Softver AVL CAMEO je inženjerski alat koji omogućava kompletno upravljanje probnim stolom za ispitivanje motora, kalibraciju upravljačkih parametara i formiranje jednostavnih matematičkih modela parametara koji karakterišu radni proces

motora. Ovaj softver je prvenstveno namenjen ispitivanju motora SUS, ali novije verzije pružaju podršku i ispitivanju hibridnih pogonskih sistema i motora sa sa sklopom menjačkog prenosnika. Za potrebe istraživanja iskorišćen je softverski modul *Test & Measure* [34, 133] koga odlikuju sledeće mogućnosti:

- Formiranje i izvođenje plana ispitivanja motora zasnovanog na konceptu faktorijskog dizajna i ostalih DE metoda;
- Mogućnost optimizacije plana ispitivanja iterativnim putem (direktna modelski zasnovana kalibracija);
- Povezivanje sa aplikativnim sistemima elektronskih upravljačkih jedinica motora (EUJ) posredstvom standardizovanih interfejsa, sa najvećom podrškom za softversko okruženje ETAS INCA [134];
- Mogućnost integracije sa AVL PUMA Open sistemom. Automatizacijom ispitnog stola omogućeno je centralizovano slanje komandi za kontrolu akvizicije i prikupljanje informacija o statističkim vrednostima merenja trenutno ispitivnog radnog režima;
- Ukoliko je plan ispitivanja motora suviše obiman, postoji podrška za umrežavanje probnih stolova.

Na slici 5.3 je prikazana šema povezivanja softverskih i aplikativnih celina za automatizovano podešavanje radnog režima motora realizovana na Katedri za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu.



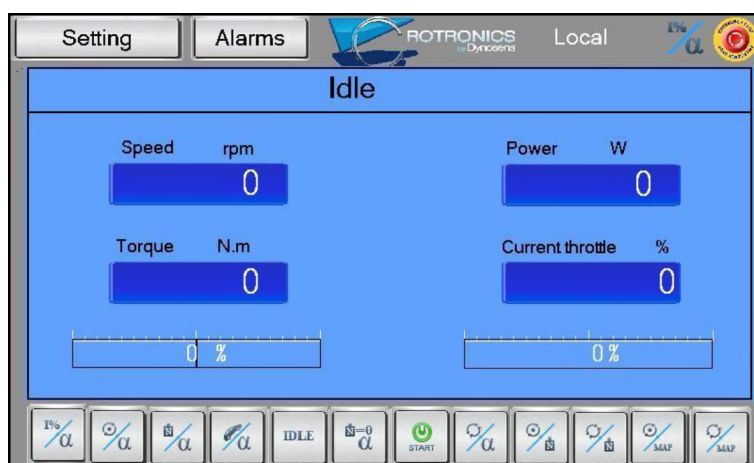
Slika 5.3.: Šema sistema probnog stola za automatizovano sprovođenje plana ispitivanja.

Aplikacija za automatizaciju ispitnog stola je posrednik u komunikaciji između kontrolera kočnice i softvera za AVL CAMEO unutar koga su formirani planovi stacionarnih ispitivanja i sekvence za dinamička ispitivanja predmetnog motora.

Ispitni sto je opremljen motorskom kočnicom koja se sa aspekta upravljanja sastoji od sledećih elemenata:

- Asinhrona mašina SCHORCH LN8280M-A;
- Digitalnog kontrolera Rotronics PGB301 [135] sa pripadajućim inverterskim blokovima i frekventnim regulatorima;
- Linearnog aktuatora namenjenog regulisanju opterećenja motora sa pripadajućim kontrolerom Rotronics CEA301 [136];
- Modula za napajanje i sigurnosnog modula;
- Interfejsa za lokalni pristup i podešavanje željenog radnog režima.

Kontroler PGB301 je osnovni modul za održavanje radnog režima sistema probnog stola koji u dvostrukoj povratnoj sprezi upravlja radnim režimom motorske kočnice i kontrolerom linearnog aktuatora, kao posrednika pri definisanju radnog režima motora SUS. Interaktivni korisnički panel kontrolera, prikazan na slici 5.4, omogućava direktan (lokalni) pristup odabiru upravljačkih modova, podešavanje i informacije o trenutnom stanju sistema. Pored lokalnog pristupa, registrima kontrolera kočnice je moguće upravljati udaljenim pristupom posredstvom MODBUS TCP/IP [137] protokola. Za ove namene, na platformama drugih proizvođača motorskih kočnica, koriste se i protokoli poput EtherCAT [138] ili PROFIBUS [139].



Slika 5.4.: Izgled korisničkog panela za lokalni pristup parametrima kontrolera kočnice.

5.3.1. Integracija MODBUS protokola

Na osnovu uputstva za aplikativnu implementaciju MODBUS protokola [140] i dodatka korisničkog uputstava kontrolera kočnice [141] koje sadrži detaljan opis svih upotrebljenih MODBUS registara, programirana je aplikacija za automatizaciju ispitnog stola. Tipovi registara ovog protokola sa osnovnim karakteristikama dati su u tabeli 5.4.

Tip registra	Veličina registra [bit]	Format	Način pristupa
Coil	1	bit	Read/Write
Discrete Input (DI)	1	bit	Read-only
Input Register (IR)	16/32	Float/UInt16/UInt32	Read-only
Holding Register (HR)	16/32	Float/UInt16/UInt32	Read/Write

Tabela 5.4.: Spisak tipova registara MODBUS TCP/IP protokola.

Svaki registar ima pripadajuću adresu i format u kome se određeni podatak čita ili upisuje. Kombinacijom tipa, adrese i formata registra može se pristupiti bilo kom parametru kontrolera kočnice. Tako na primer, ukoliko želimo da očitamo koji je lokalni kontrolni mod kočnice trenutno aktivan, potrebno je da se sa *Input Register*-a (IR) sa adrese 210 u formatu UInt16 očita vrednost i uporedi sa podacima iz spiska raspoloživih kontrolnih modova datih u tabeli 5.5. Na sličan način, ukoliko želimo da odaberemo kontrolni mod sistema putem udaljenog pristupa, potrebno je da upišemo određenu vrednost registra, koja odgovara željenom kontrolnom modu, na *Holding Register* (HR) na adresi 083 u propisanom formatu.

Softver AVL CAMEO poseduje mogućnost povezivanja sa centralnim sistemom za kontrolu probnog stola (serverom) posredstvom takozvane *Get/Set* komunikacije bazirane na *Simple TCP-IP* protokolu [142, 143]. Ostvarivanjem ovakvog tipa komunikacije, na svaku naredbu se odgovara na tačno definisan način i u što kraćem vremenskom roku, s tim da tek po pristizanju odgovora, klijent (AVL CAMEO) može da pošlje sledeću naredbu. *Get/Set* komunikacija nema mogućnost regulisanja prioriteta odgovora na prispele naredbe, već se isključivo odgovori formiraju na osnovu redosleda pristiglih upita.

Vrednost registra	Naziv upravljačkog moda	Upravljački mod motorske kočnice	Upravljački mod linearnog aktuatora (motora SUS)
0	Manual load/ Alpha	Konstantno opterećenje	Konstantan položaj papučice gasa
1	Speed (brake)/ Alpha	Konstantan broj obrtaja vratila kočnice (samo kočenje)	Konstantan položaj papučice gasa
2	Torque/Alpha	Konstantan moment kočenja	Konstantan položaj papučice gasa
3	RLS/Alpha	Simulacija opterećenja vozila na putu	Konstantan položaj papučice gasa
4	Idle	Deaktivirano	Konstantan položaj papučice gasa 0%
5	Freewheel/Alpha	Deaktivirano	Konstantan položaj papučice gasa
6	Starter	Pokretanje	Konstantan položaj papučice gasa
7	Speed/Alpha	Konstantan broj obrtaja vratila kočnice	Konstantan položaj papučice gasa
8	Speed (brake)/ Torque	Konstantan broj obrtaja vratila kočnice (samo kočenje)	Konstantan obrtni moment
9	Speed/Torque	Konstantan broj obrtaja vratila kočnice	Konstantan obrtni moment
10	Speed (brake)/ Admission pressure	Konstantan broj obrtaja vratila kočnice (samo kočenje)	Konstantan pritisak u usisnom kolektoru
11	Speed/Admission pressure	Konstantan broj obrtaja vratila kočnice	Konstantan pritisak u usisnom kolektoru
12	Torque/Speed	Konstantan moment kočenja	Konstantan broj obrtaja KV
13	-	-	-
14	RLS/Velocity	Simulacija opterećenja vozila na putu	Konstantna brzina vozila

Tabela 5.5.: Upravljački modovi kontrolera motorske kočnice Rotronics PGB301.

Postoji ukupno 17 naredbi koje AVL CAMEO izdaje centralnom sistemu za automatizaciju [144]. Primera radi, u tabeli 5.6 dat je opis poruka koje se razmenjuju prilikom realizacije naredbe *DefineChannelNames*. Izdavanjem ove komande definiše se skraćena lista kanala za planirani test. Potreba za skraćanjem liste kanala postoji zbog ograničene veličine bafera upravljačkog dela programa AVL CAMEO (eng.: *driver*), čija je veličina 1 MB, kao i zbog povećanja brzine odgovora. Ovom koman-

dom se pored skraćene liste kanala prosleđuju merne jedinice u kojima su izražene vrednosi kanala kao i informacija o tipu kanala.

Komanda	DefineChannelNames
Argument	broj kanala za koji se šalje upit, naziv kanala 1, ..., naziv kanala n
Odgovor	eho komande, broj kanala za koji se šalje upit, naziv kanala 1, merna jedinica kanala 1, tip kanala 1, ..., naziv kanala n , merna jedinica kanala n , tip kanala n
Primer komande	DefineChannelNames Engine_Speed Engine_Load Oil_Pressure
Primer odgovora	DefineChannelNames,3,Engine_Speed,min- 1,S,Engine_Load,%,S,Oil_Pressure,bar,F
	gde je tip kanala ograničen na sledeći način:
	S setpoint (moguće upisivanje vrednosti u registar)
	F feedback (moguće je samo očitavanje registra)
	V calculation (moguće je samo očitavanje registra)

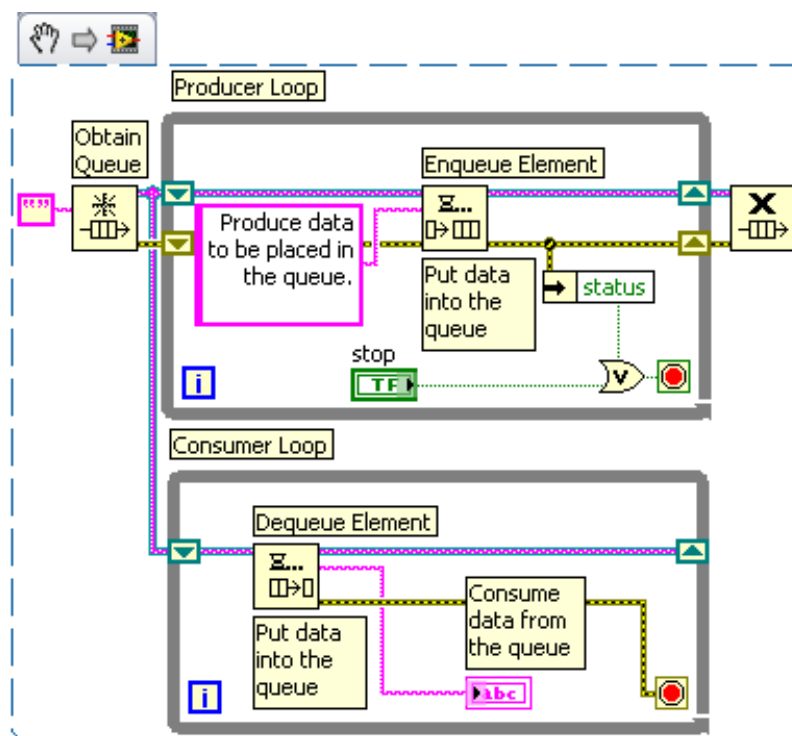
Tabela 5.6.: Primer komande upućene od strane softvera AVL CAMEO ka centralnom sistemu za automatizaciju probnog stola za ispitivanje motora.

Osnovna funkcionalnost aplikacije za automatizaciju ispitnog stola je priprema i slanje odgovora na upite koji stižu od strane AVL CAMEO softvera, a na osnovu informacija MODBUS registara kontrolera kočnice. Raspoloživih registara kontrolera kočnice ima 576, od kojih se za prvu iteraciju razvoja aplikacije koristi samo ograničen broj. Sa ciljem buduće nadogradnje aplikacije za automatizaciju ispitivanja, arhitektura programa je pažljivo birana kako bi zadovoljila sledeće uslove:

- Aplikacija mora da bude modularna, odnosno dograđivanje funkcionalnosti ne sme da remeti postojeće funkcije;
- Korišćeni podprogrami moraju da budu skalabilni, odnosno moraju da omogućće jednostavno proširenje postojećih delova kôda (prvenstveno informacija vezanih za registre korišćenog protokola);

- Petlja za očitavanje i slanje poruka mora da ima mogućnost prilagođavanja brzine izvršavanja jer brzina generisanja odgovora zavisi od broja promenljivih čije vrednosti moraju da se osveže vrednostima sa odgovarajućeg MODBUS registara;
- Ne sme da se dozvoli propuštanje odgovora na pristigli upit;
- Potrebno je da izvršavanje aplikacije bude optimizovano u smislu što manjeg zauzimanja procesorskih i memorijskih resursa korišćenog računara.

Korišćena NI LabVIEW aplikacija, koja zadovoljava navedene uslove, zasniva se na primeni *Producer/Consumer* [145] arhitekture. Ovakav način paralelnog postavljanja petlji omogućava razmenu podataka iako se petlje, po pravilu, izvršavaju različitom brzinom. Naredbe koje izdaje *Producer* petlja stavljaju se u red (eng.: *Queue*), koje se nezavisno od broja pristiglih naredbi, hronološkim redosledom izvršavaju unutar *Consumer* petlje. Primer *Producer/Consumer* arhitekture je preuzet iz baze NI LabVIEW primera i prikazan je na slici 5.5. Na ovaj način, osigurava se pouzdano generisanje odgovora na svaku pristiglu naredbu.



Slika 5.5.: Primer *Producer/Consumer* arhitekture u okviru NI LabVIEW programskog okruženja [146].

Osnovni nedostatak ovakve arhitekture je nepredvidivo vreme neophodno za izvršavanje pojedinačnog prolaza *Consumer* petlje, koje zavisi od kompleksnosti tra-

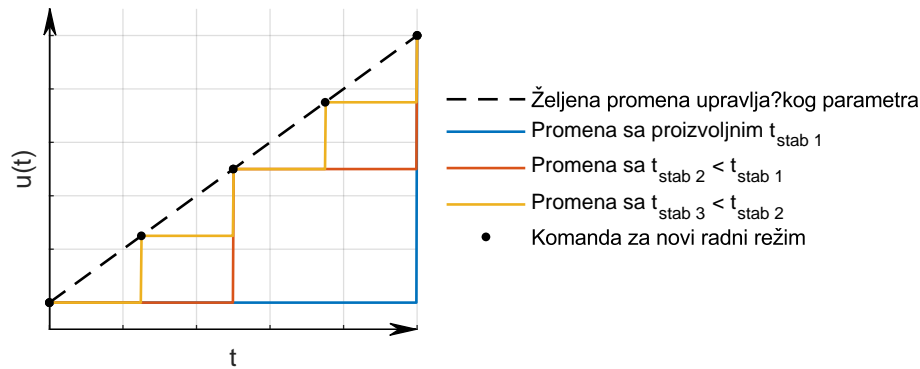
ženog odgovora. Razlike u brzini izvršavanja *Consumer* petlje se najbolje ogledaju pri realizaciji komandi *WatchDogStart* i *GetAllChannels*. Za prvi navedeni primer odgovor se definiše za manje od 1 ms, dok u slučaju naredbe *GetAllChannels*, izvršenje petlje traje oko 2500 ms. Rešenje ovog problema je u optimizaciji *Consumer* petlje, smanjenju broja kanala kojima manipuliše AVL CAMEO, kao i korišćenju prethodno opisane funkcije *DefineChannelNames*.

Stacionarno ispitivanje motora odlikuje vreme stabilizacije koje se eksplicitno zadaje ili na drugi način proverava prilikom realizacije ispitivanja. Prva ideja pri sprovođenju dinamičkog ispitivanja motora može da bude formiranje niza stacionarnih radnih režima, sa relativno kratkim vremenom stabilizacije, čijim će se sprovođenjem dobiti željena dinamička promena. Nažalost, realizacijom ovako definisanog dinamičkog testa se neće dobiti dobri rezultati iz sledećih razloga:

- Zbog relativno kratkog vremena stabilizacije, eksperiment sadrži veliki broj radnih režima koje treba realizovati intenzivnim slanjem komandi za postavljanje novog radnog režima i postoji mogućnost preopterećenja komunikacije, odnosno pojave vremenskog kašnjenja;
- Između zadavanja komande za podešavanje novog radnog režima, softver AVL CAMEO može da izda i druge komande na koje korisnik ne može da ima uticaj, a time se narušava vremenska sinhronizacija željenog dinamičkog testa;
- Ukoliko se vreme stabilizacije poveća, promena upravljačkog parametra neće biti približno konstantnog gradijenta, već će to biti stepenasta promena koja je (preuveličano) prikazana na slici 5.6;
- Ponovljivost testa je narušena kao posledica nepredvidivog kašnjenja pri zadavanju radnih režima dinamičke sekvence.

Sa ciljem prevazilaženja navedenih nedostataka, aplikacija za automatizaciju probnog stola je nadograđena funkcionalnošću za kontinualnu promenu nekog od dostupnih upravljačkih parametara primenom takozvane „rampe” pod uslovom da je test konfigurisan tako da AVL CAMEO šalje komande pod nazivom *RampSetpoint*. Izdavanje komandi koje definišu promenu kontrolnog parametra kontrolera kočnice po zakonu rampe realizuje se za oba parametra izabranog kontrolnog moda kočnice. S obzirom na to da se nova komanda izdaje tek po pristizanju odgovora na prethodnu komandu, realizacija funkcionalnosti kontrole rampi je rešena dodavanjem još jedne *Consumer* petlje koja je zadužena samo za ovaj tip komande. S obzirom na

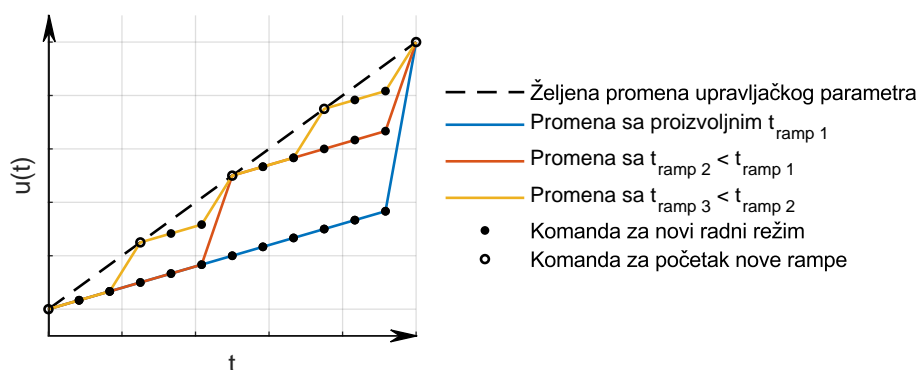
to da kontroler kočnice nema ugrađenu mogućnost prepoznavanja komandi za dinamičko zadavanje radnih režima, pri detektovanju poruke *RampSetpoint*, aplikacija za automatizaciju probnog stola, nezavisno od dalje komunikacije sa AVL CAMEO softverom, osvežava registre kontrolera kočnice na odgovarajući način.



Slika 5.6.: Promena upravljačkog parametra pri definisanju dinamičkog testa kao niza uzastopnih stacionarnih tačaka sa različitim vremenom stabilizacije.

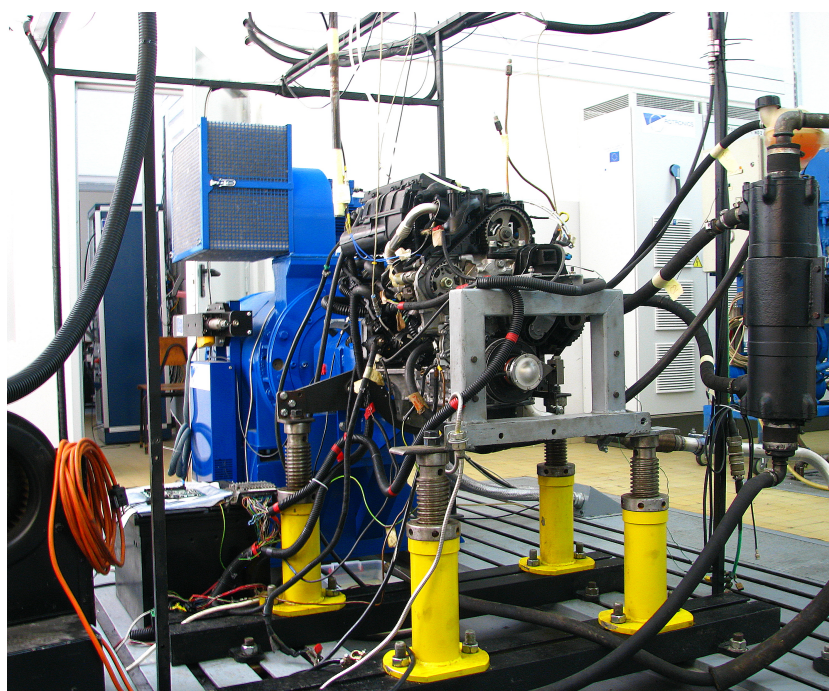
Pri podešavanju dinamičkih testova treba biti posebno obazriv kako bi se realizovana promena upravljačkog parametra u što većoj meri poklapala sa predviđenom promenom za dati dinamički test. Definisane rampe je komanda kod koje se zadaje vrsta upravljačkog parametra i vreme za koje taj parametar treba da dostigne željenu vrednost, počevši od vrednosti na kojoj se trenutno nalazi.

Na slici 5.7 je prikazana željena linearna promena upravljačkog parametra u funkciji vremena. Takođe, prikazana je potencijalna realizacija ovakvog eksperimenta ukoliko se promena definiše jednom rampom, odnosno jednom komandom *RampSetpoint*. Kao što je prethodno naglašeno, aplikacija za automatizaciju probnog stola ima kontrolu brzine izvršavanja petlji, ali se ne izvršava u realnom vremenu i određena minimalna kašnjenja su očekivana. Kako bi se ispunila očekivana vrednost srednjeg gradijenta promene upravljačkog parametra, preporučuje se parcijalno definisanje rampi na način prikazan na slici 5.7. Naravno, ovakvo podešavanje ima smisla ukoliko postoji potreba za preciznom realizacijom sporih dinamičkih testova, što i jeste predmet ovog istraživanja.



Slika 5.7.: Promena upravljačkog parametra pri realizaciji dinamičkog testa kao niza uzastopnih rampi različitog trajanja.

Na slici 5.8 je prikazan motor i motorska kočnica koji su korišćeni tokom predmetnog istraživanja.



Slika 5.8.: Fotografija laboratorijske instalacije za predmetno izstaživanje na Katedri za motore SUS.

6. Dinamičko ispitivanje motora metodom SDN

Klasičan pristup pri sprovođenju stacionarnog ispitivanja radnog režima motora SUS podrazumeva podešavanje svih upravljačkih parametara na željenu vrednost i skladištenje merenih podataka u datoteke nakon isteka vremena neophodnog za stabilizaciju radnog režima, kao što je opisano u poglavlju 4.1. Osrednjavanjem tako snimljenih podataka, dobijaju se najtačniji rezultati koji karakterišu dati radni režim. Pri podešavanju i za vreme stabilizacije, merene veličine imaju promenljiv karakter i tokom ovih perioda se ne izvršava snimanje u datoteke. U stabilnom području rada, merena veličina ima određeno kašnjenje na dato promenljivo upravljanje, što je posledica dinamike ispitivanog sistema kao i komponenti elemenata mernih lanaca. Kako bi se uštedelo vreme potrebno za ispitivanje niza stacionarnih radnih režima, razvijena je metoda spore i kontinualne promene upravljačkog parametra [18, 147, 148] tokom čijeg izvođenja merene veličine imaju manji ili veći otklon u odnosu na vrednosti koje bi imale u slučaju stacionarnog ispitivanja. U literaturi se koriste različiti nazivi za ovakav način ispitivanja motora SUS, a neki od nji su:

- *Slow Dynamic Slope* - spora promena upravljačkog parametra po nagibnoj funkciji. Simetrična pobuda se koristi ukoliko su testovi brži, odnosno ukoliko postoji veći otklon merene veličine. Ova metoda dozvoljava simultano variranje upravljačkih veličina.
- *Sweep Mapping* - dinamičko ispitivanje motora bržom promenom jednog upravljačkog parametra.
- *Tip-in tip-out* - brza ili spora promena upravljačkog parametra rezervisanog za zadavanje opterećenja motora. Za vreme ovakvih testova broj obrtaja motora može da se održava na konstantnom nivou posredstvom motorske kočnice ili se motor koristi po upotrebnoj krivoj, ukoliko je reč o vanlaboratorijskom

ispitivanju vozilskog motora. Cilj ovakvih ispitivanja je uglavnom podešavanje prelaznih režima ili dijagnostika nepravilnosti u radu.

6.1. Teorijske osnove metode SDN

Dinamičko ispitivanje motora zasnovano na principima spore i kontinualne promene ulazne veličine, može da se prikaže u analitičkom obliku pomoću nagibne funkcije:

$$n(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \beta \cdot t & t \geq 0, \beta \in \mathfrak{R} \end{cases} \quad (6.1)$$

što može da se zapiše u kraćem obliku:

$$n(t) = \beta \cdot t \cdot h(t) \quad (6.2)$$

gde je β , nagib funkcije izražen preko:

$$\beta = \frac{du}{dt} \quad (6.3)$$

i jedinične odskočne funkcije (Hevisajdove funkcije) $h(t)$ definisane na sledeći način:

$$h(t) \begin{cases} = 0 & t < 0 \\ \in [0, 1] & t = 0 \\ = 1 & t > 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

Za primer linearnog sistema prvog reda važi diferencijalna jednačina oblika:

$$T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t) \quad (6.5)$$

gde su T_1 vremenska konstanta i K pojačanje sistema. U slučaju promene upravljačkog parametra nagibnom funkcijom 6.2 za $t > 0$, promena upravljačke veličine u funkciji vremena je:

$$u(t) = \beta \cdot t \quad (6.6)$$

Rešavanje linearne diferencijalne jednačine 6.5 za datu promenu upravljačkog parametra realizuje se analitičkim putem primenom Laplasove transformacije [149]. Laplasova transformacija omogućava prelazak iz vremenskog u kompleksni domen u kome se funkcije poput sinusne, kosinusne, eksponencijalne, itd. prevode u algebarske funkcije kompleksne promenljive s . Operacije kao što su računanje izvoda i integraljenje zamenjuju se algebarskim operacijama u kompleksnoj ravni. To znači da se diferencijalne jednačine prevode u algebarske jednačine kompleksne promenljive s . Rešenja tih jednačina u funkciji promenljive s se prevode u vremenski domen primenom inverzne Laplasove transformacije, korišćenjem tabličnih vrednosti transformacije, ili određivanjem rezidijuma (ostatka) i razlaganjem rešenja na elementarne tablične funkcije. Osim toga, primena Laplasove transformacije na diferencijalnu jednačinu ponašanja sistema dovodi do pojma prenosne funkcije sistema, koja ima fundamentalni značaj jer omogućava da se analiza dinamičkog ponašanja sistema izvrši u kompleksnom i frekventnom domenu [150]. Laplasova transformacija funkcije $x(t)$ je definisana ako postoje granične vrednosti te funkcije:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0^{\pm}} \int_{\alpha}^{+\infty} x(t) e^{-st} dt \quad (6.7)$$

kako bi se napravila podela na levu Laplasovu transformaciju funkcije $x(t)$:

$$\mathcal{L}^{-}\{x(t)\} = X^{-}(s) = \int_{0^{-}}^{+\infty} x(t) e^{-st} dt \quad (6.8)$$

i desnu Laplasovu transformaciju funkcije $x(t)$:

$$\mathcal{L}^{+}\{x(t)\} = X^{+}(s) = \int_{0^{+}}^{+\infty} x(t) e^{-st} dt \quad (6.9)$$

Pod uslovom da važi:

$$X^{-}(s) = X^{+}(s) \quad (6.10)$$

funkcija $x(t)$ ima Laplasovu transformaciju oblika:

$$\mathcal{L}\{x(t)\} = X(s) = \int_0^{+\infty} x(t) e^{-st} dt \quad (6.11)$$

Laplasova transformacija ima osobine linearnog operatora, odnosno važi zakon superpozicije:

$$\mathcal{L}\{\alpha_1 x_1(t) + \alpha_2 x_2(t)\} = \alpha_1 \mathcal{L}\{x_1(t)\} + \alpha_2 \mathcal{L}\{x_2(t)\} \quad (6.12)$$

Takođe, veliku primenu imaju osobine vezane za diferenciranje i integraljenje. Ukoliko je funkcija $x(t)$ k -puta diferencijabilna, onda je Laplasova transformacija k -tog izvoda te funkcije:

$$\mathcal{L}\{x^{(k)}(t)\} = s^k \mathcal{L}\{x(t)\} - \sum_{i=1}^k s^{(i-1)} x^{(k-i)}(0) \quad (6.13)$$

Ako je funkcija $x(t)$ integrabilna i ako važi da je:

$$\int_{0-}^{0+} x(t) dt = 0 \quad (6.14)$$

sledi:

$$\mathcal{L}\left\{\int_0^t x(t) dt\right\} = \frac{1}{s} \mathcal{L}\{x(t)\} \quad (6.15)$$

Dalji koraci pri rešavanju linearne diferencijalne jednačine 6.5 za uslove date u 6.6 su:

- Rešavanju algebarske jednačine u s domenu po izlaznoj promenljivoj, odnosno određivanje njenog kompleksnog lika;
- Razvoj kompleksnog lika izlazne promenljive u parcijalne razlomke (Hevisajdov razvoj);
- Povratak u vremenski domen (inverzna Laplasova transformacija);

što rezultuje jednačinom izlazne veličine $y(t)$ oblika:

$$y(t) = K \cdot \beta \cdot t - K \cdot \beta \cdot T_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \quad (6.16)$$

Otklon izlazne veličine $y(t)$, za nagibnu pobudu u datom trenutku, može da se posmatra kao razlika izlaznih veličina modeliranog sistema koji karakteriše vremenska konstanta $T_1 \neq 0$ i odziva sistema koji bi imao isključivo proporcionalno dejstvo,

odnosno identičnu stacionarnu karakteristiku (pojačanje) i vremensku konstantu $T_1 = 0$:

$$\Delta y(t) = y(t) - y(t | T_0 = 0) \quad (6.17)$$

odakle sledi:

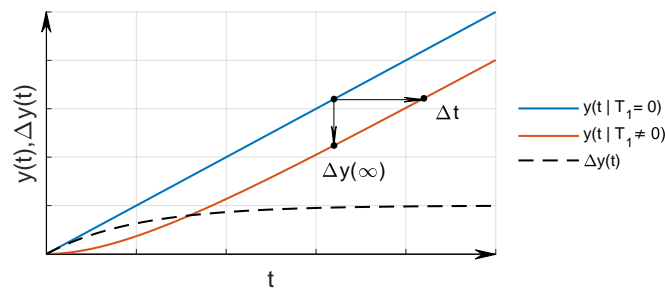
$$\Delta y(t) = K \cdot \beta \cdot t - K \cdot \beta \cdot T_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) - K \cdot \beta \cdot t \quad (6.18)$$

$$\Delta y(t) = -K \cdot \beta \cdot T_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \quad (6.19)$$

Ukoliko se posmatra nagibna promena za $t \rightarrow \infty$, dobija se zavisnost:

$$\Delta y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = -K \cdot \beta \cdot T_1 \quad (6.20)$$

Vrednost otklona $\Delta y(\infty)$ proporcionalna je pojačanju K , nagibu ulazne funkcije β i vremenskoj konstanti T_1 posmatranog linearnog sistema prvog reda, što je prikazano na slici 6.1. Ukoliko se posmatra promena ulazne veličine nagibnom funkcijom dovoljno niskog gradijenta, odnosno nagiba $\beta \rightarrow 0$, takva pobuda sistema bi mogla da se zameni nizom stacionarnih pobuda, jer je u tom slučaju $\lim_{\beta \rightarrow 0} y(t) \Rightarrow \Delta y(\infty) = 0$. Sa druge strane, vrednosti stacionarnog odziva za promenu ulazne veličine kod koje je $\beta \neq 0$ bi se dobile kada bi sistem imao dovoljno nisku vrednost vremenske konstante $T_1 \rightarrow 0$, tj. kada bi dovoljno brzo reagovao na promenu upravljačke veličine [14].

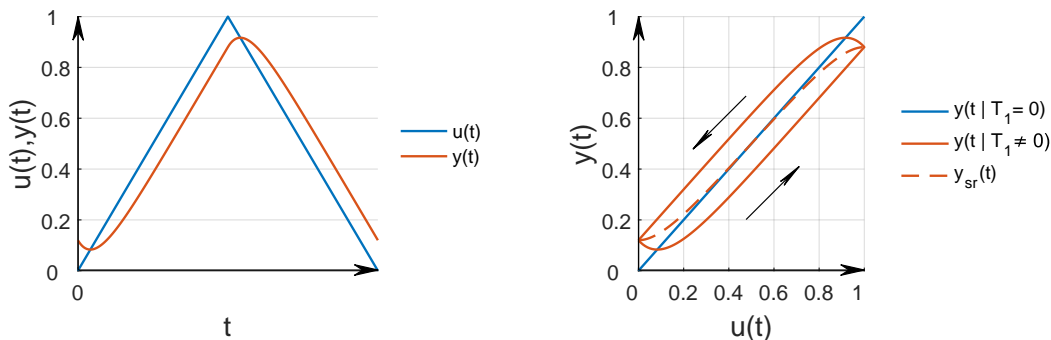


Slika 6.1.: Otklon izlazne veličine linearnog sistema prvog reda sa vremenskom konstantom $T_1 \neq 0$ u odnosu na stacionarnu karakteristiku sistema ($T_1 = 0$).

Kod ispitivanja realnog sistema, za slučaj promene upravljačkog parametra po nagibnoj funkciji dovoljno niskog gradijenta, otklon izlazne veličine bi bio zanemariv jer

bi bio reda veličine greške merenja ili uticaja poremećajnih faktora. Nažalost, ovakav način prikupljanja podataka koji karakterišu približno stacionarne odzive sistema nije praktičan jer bi realizacija promene upravljačkog parametra od minimalne do maksimalne vrednosti predugo trajala. Dalje skraćenje trajanja eksperimenta bi se postiglo primenom nagibne funkcije većeg gradijenta, ali u tom slučaju otklon Δy (β) bi mogao da se kompenzuje dodatnim eksperimentom kod koga bi se primenila nagibna funkcija suprotnog gradijenta. Na slici 6.2a je prikazana promena upravljačkog parametra i odziva linearnog sistema prvog reda u vremenskom domenu. Ukoliko se vrednost odziva prikaže u funkciji ulazne promenljive, kao na slici 6.2b, formira se svojevrsna ovojnica i srednja linija koja se računa kao aritmetička sredina vrednosti uzlazne i silazne promene. Stacionarna karakteristika linearnih sistema prvog reda može da se odredi ukoliko je poznato pojačanje sistema ili analizom:

- Stacionarnog odziva sistema pobuđenog različitim stacionarnim vrednostima ulazne veličine;
- Odziva na beskonačno sporu dinamičku pobudu;
- Odziva na (beskonačno) brzu dinamičku pobudu uz postavljanje vremenske konstante na vrednost $T_1 = 0$. Na ovaj način je određena stacionarna karakteristika primera sistema sa slike 6.2b.



(a) Pobuda u odziv u vremenskom domenu. (b) Odziv sistema u domenu ulazne veličine.

Slika 6.2.: Primer pobude i odziva linearnog sistema prvog reda.

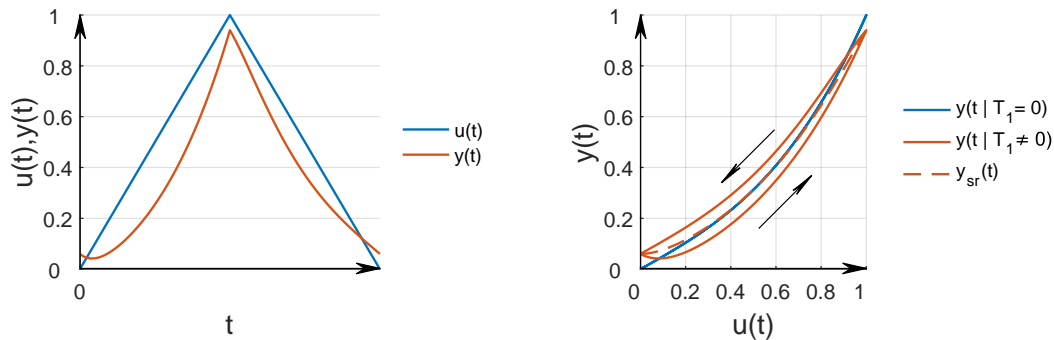
Na slici 6.3 je prikazan identičan kocept na primeru nelinearnog sistema prvog reda. Za razliku od linearnih, kod nelinearnih sistema ne važi zakon aditivnosti:

$$y(u_1(\infty) + u_2(\infty)) \neq y(u_1(\infty)) + y(u_2(\infty)) \quad (6.21)$$

i multiplikativnosti:

$$y(ku(\infty)) \neq ky(u(\infty)) \quad (6.22)$$

što se ogleda kroz nelinearnu stacionarnu karakteristiku sistema. Ovaj primer nelinearnog sistema formiran je na osnovu strukture Vinerovog modela [43], odnosno linearni sistem iz primera sa slike 6.2 je nadograđen nelinearnim članom oblika stacionarne funkcije ulazne promenljive (stacionarni aproksimator). Promena ulazne veličine i odziva ovakvog sistema u vremenskom domenu prikazana je na slici 6.3a. Izlazna veličina u funkciji vremenski promenljive ulazne veličine, takođe formira ovojniju karakterističnu za dati primer i prikazana je na slici 6.3b. Srednja linija ovojnice određena je na identičan način kao i u primeru linearnog sistema prvog reda. Očekivano, srednja linija se, na određenom delu opsega ulazne promenljive poklapa sa linijom koja karakteriše stacionarni odziv nelinearnog sistema. Linija stacionarnog odziva sistema određena je postavljanjem vremenske konstante sistema na $T_1 = 0$ kao i u prethodnom primeru.



(a) Pobuda i odziv u vremenskom domenu.

(b) Odziv sistema u domenu ulazne veličine.

Slika 6.3.: Primer pobude i odziva nelinearnog sistema prvog reda.

6.2. Uslovi za sprovođenje dinamičkog testa

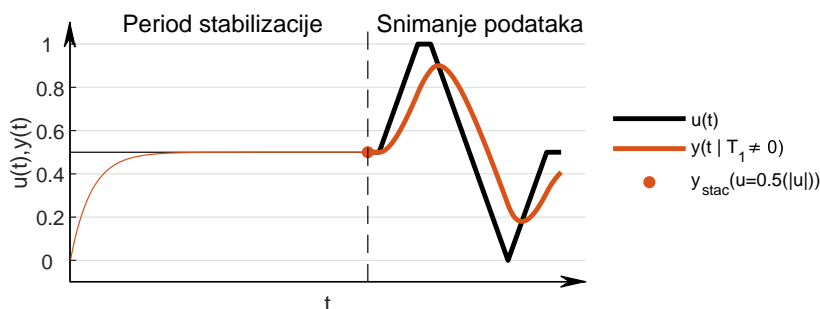
U poglavlju 6.1 je na primeru linearnog i nelinearnog sistema prvog reda prikazana ideja sprovođenja dinamičkog testa variranjem upravljačkog parametra po nagibnoj funkciji. Praktična realizacija ovakvog eksperimenta zahteva razmatranje i definisanje dodatnih parametara kako bi ponovljivost testa bila zadovoljavajuća. S obzirom na to da su procesi koji se odvijaju u motoru SUS nelinearni, bitna je informacija o radnom režimu sa koga se započinje sprovođenje dinamičkog testa [26].

Pre nego što budu prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja, na primeru linearnog sistema prvog reda će biti demonstrirani koncepti SDN testa koji započinju sa stacionarnog radnog režima i testa koji ne sadrži elemente stacionarnog radnog režima, tj. kod koga izostaju periodi ustaljenih vrednosti ulaznih i izlaznih veličina.

Sa ciljem da se dođe do jednostavnije interpretacije i analize snimljenih podataka tokom dinamičkog ispitivanja motora, postavljeno je ograničenje u smislu variranja samo jednog nezavisnog upravljačkog parametra, dok se ostali održavaju na konstantnom nivou. Kao što je napomenuto, radni režim je okarakterisan brojem obrtaja i opterećenjem motora kao globalnim upravljačkim promenljivim veličinama i u tom smislu motor je ispitivan po karakteristici opterećenja, tj. varirano je opterećenje uz zadržavanje konstantnog broja obrtaja. Važno je napomenuti da se dinamičkim ispitivanjem motora na konstantnom broju obrtaja izbegava problem indukovanja parazitnog obrtnog momenta koji je posledica inercije motorskog mehanizma i promenljive ugaone brzine elemenata motora koji vrše rotaciono i složeno kretanje [151]. Takođe, interpretacija indikatorskih parametara je jednostavnija jer je jednako trajanje radnih ciklusa posmatano u vremenskom domenu. Više detalja o konfiguraciji realizovanih dinamičkih ispitivanja biće dato u poglavlju 6.3.

Na slici 6.4 je prikazana promena upravljačkog parametra i odziva linearnog sistema za dinamičku sekvencu koja započinje nakon perioda stabilizacije, tj. sa stacionarnom pripremom (SP) sistema. Podešavanje upravljačkog parametra može da se podeli u nekoliko celina koje karakteriše sledeće:

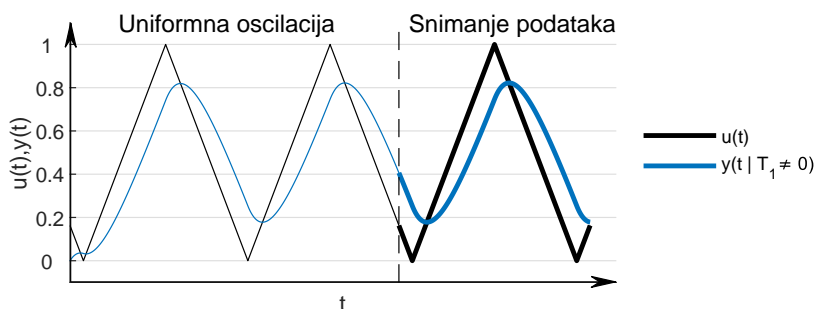
- Upravljački parametar je postavljen na polovinu opsega i zadržava se na tom nivou sve do isteka perioda stabilizacije najinertnije izlazne veličine;
- Promena po nagibnoj funkciji sa pozitivnim gradijentom do dostizanja maksimalne vrednosti;
- Relativno kratko zadržavanje upravljačke veličine na maksimalnom nivou;
- Promena po nagibnoj funkciji simetričnog negativnog gradijenta do dostizanja minimalne vrednosti;
- Vraćanje upravljačkog parametra na početnu vrednost nagibnom funkcijom pozitivnog gradijenta i zadržavanje na nivou sa početka dinamičkog dela testa.



Slika 6.4.: Primer odziva lineanog sistema prvog reda na pobudu pobudu sa SDN nakon isteka perioda stabilizacije.

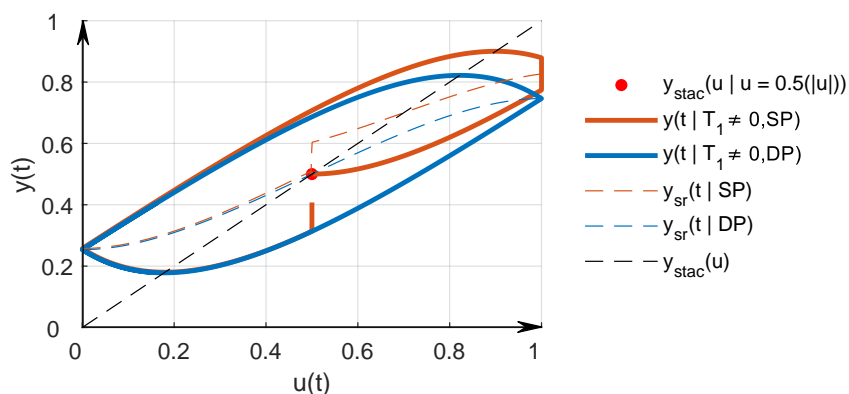
Ovakav koncept je prikazan u istraživanju [19]. S obzirom na to da se tokom testa varira opterećenje motora, kratkotrajno zadržavanje na maksimalnom opterećenju je opravdano kako bi se nadomestio uticaj termičke inercije sistema, tj. otklon mernih veličina kod kojih promenljiv temperaturski fluks ima značajan uticaj. Period tokom koga se vrše snimanja merenih veličina započinje nakon dostizanja stacionarnog radnog režima.

Slično ispitivanje može da se realizuje ukoliko se primeni dinamička promena upravljačke veličine u periodu pripreme za snimanje željenog dinamičkog testa (dinamička priprema sistema - DP). Takav primer je prikazan na slici 6.5, a osnovna ideja se ogleda u obezbeđivanju ponovljivih oscilacija izlaznih veličina. Trenutak u kome započinje snimanje mernih veličina uslovljen je dovoljno niskom vrednošću odstupanja merenja iz prethodne periode.



Slika 6.5.: Primer odziva lineanog sistema prvog reda na pobudu sa SDN nakon uvođenja sistema u režim ponovljivih oscilacija.

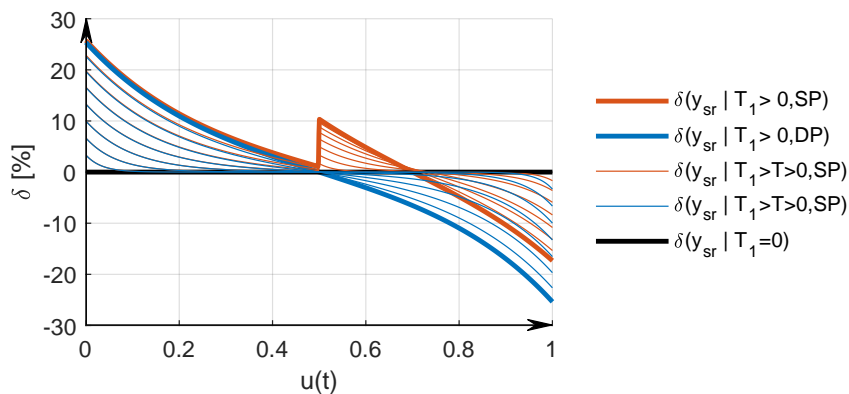
Najbolji način da se uporede prednosti i nedostaci ova dva pristupa u pripremi sistema za izvođenje testa sa SDN je analiza ovojnice izlazne veličine predstavljena u funkciji ulazne veličine, što je za sistem pojačanja $K = 1$ i vremenske konstante $T_1 \neq 0$, prikazano na slici 6.6.



Slika 6.6.: Stacionarna aproksimacija odziva dinamičkog sistema ispitivanog metodom SDN sa stacionarnom i dinamičkom pripremom.

Za test sa stacionarnom pripremom se primećuje određeni diskontinuitet srednje linije ovojnice. Takođe, ova linija se u zoni viših vrednosti ulaznog parametra u većoj meri poklapa sa linijom stacionarnog odziva sistema zahvaljujući kratkotrajnom zadržavanju na maksimalnoj vrednosti upravljačkog parametra u . Sa druge strane, ukoliko se sistem ispituje prethodnim uvođenjem u ponovljive oscilacije, srednja linija je glatka, ali pri graničnim vrednostima upravljačkog parametra doći će do većeg odstupanja u odnosu na liniju regresije posmatranog sistema.

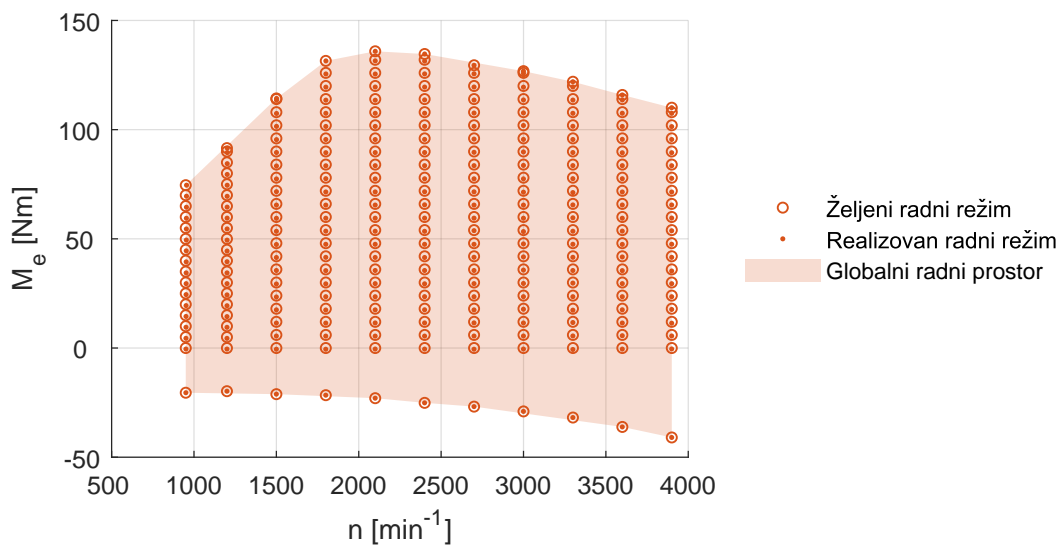
U zavisnosti od toga koliki je nagib nagibne funkcije ili vremenska konstanta posmatranog sistema, razlika između uzlazne i silazne linije ovojnice će biti veća ili manja, što određuje poklapanje srednje linije ovojnice i linije stacionarnog odziva sistema. Na slici 6.7 je prikazana relativna razlika δ između srednje linije ovojnice i linije stacionarnog odziva za linearne sisteme sa različitim vrednostima vremenskih konstanti, a za prethodno opisane pristupe pri podešavanju radnog režima u smislu stabilizacije ili uvođenja sistema u ponovljive oscilacije.



Slika 6.7.: Relativne razlike između srednje linije ovojnice izlazne veličine i stacionarnih vrednosti odziva posmatranog sistema.

6.3. Praktična realizacija testa sa SDN

Dinamičkom ispitivanju motora je prethodilo ispitivanje na stacionarnim režimima, kako bi rezultati, ova dva fundamentalno različita pristupa, mogli da se uporede. Na praznom hodu, upravljačka jedinica je zadužena za održavanje minimalnog broja obrtaja koji iznosi 900 min^{-1} . Kako bi se izbegao paralelni uticaj kontrolera minimalnog broja obrtaja na EUJ i kontrolera broja obrtaja motorske kočnice na niskim brzinskim režimima, minimalan broj obrtaja na kome je ispitivan motor iznosi 950 min^{-1} . Planom stacionarnog ispitivanja podrazumevani su i brojevi obrtaja od 1200 min^{-1} do 3900 min^{-1} sa korakom od po 300 min^{-1} . Opterećenje motora je održavano i kontrolisano u povratnoj sprezi posredstvom kontrolera kočnice od nulte do maksimalne vrednosti efektivnog obrtnog momenta. Takođe, sprovedeno je ispitivanje režima motoriranja motora, tj. ispitivanje radnog režima na zadatom broj obrtaja uz potpuni izostanak ubrizgavanja goriva. Na slici 6.8 su prikazani željeni i realizovani radni režimi u domenu globalnih upravljačkih veličina, tj. broja obrtaja motora n i opterećenja motora izraženog preko efektivnog obrtnog momenta M_e . Ukupan broj ispitanih stacionarnih radnih režima je 248.



Slika 6.8.: Globalni prostor nezavisnih upravljačkih veličina i položaji ispitanih stacionarnih radnih režima.

6.3.1. Test sa SDN i stacionarnom pripremom sistema

S obzirom na to da je pri sprovođenju dinamičkih sekvenci ispitivanja variran parametar opterećenja, a maksimalni i minimalni efektivni obrtni moment su funkcija broja obrtaja motora, svi dinamički testovi su posebno konfigurisani uzimajući u obzir granične vrednosti upravljačkih veličina. Pored promenljivih vrednosti amplitude opterećenja motora, svaki dinamički test započet sa stacionarnog režima prema konceptu sa slike 6.4, izvršen je na brojevima obrtaja za koje su prethodno obavljena stacionarna ispitivanja. Na taj način je dinamičkim ispitivanjima u potpunosti obuhvaćen globalni prostor stacionarnih upravljačkih veličina sa slike 6.8. Takođe, svaki dinamički prolaz po karakteristici opterećenja konfigurisan je sa različitim ukupnim vremenom rampe, odnosno različitim gradijentom uzlazne i silazne nagibne funkcije. Kao što je navedeno, period snimanja podataka za dinamička ispitivanja podeljen je u više celina, od kojih su period prvobitnog stacionarnog režima (#1), period zadržavanja na maksimalnom radnom režimu (#3) i period nakon poslednje nagibne promene (#6) trajali po 10s. Ukupno vreme svake pojedinačne nagibne promene varirano je sa ciljem određivanja zavisnosti između ukupnog trajanja testa i kvaliteta, tj. mogućnosti interpretacije rezultata dinamičkog ispitivanja. U tabeli 6.1 prikazana su trajanja pojedinih segmenata kao i način označavanja ovako konfigurisanih dinamičkih testova. Motor je ispitivan na ukupno 11 brzinskih režima, a za svaki od njih sprovedeno je po 7 dinamičkih ispitivanja sa različitim vremenima

rampe, tj. različitim gradijentima nagibne funkcije. S obzirom na to da dinamička sekvenca započinje stacionarnim radnim režimom, izdvojeno je od 5 do 10 minuta za stabilizaciju radnog režima pred početak snimanja podataka.

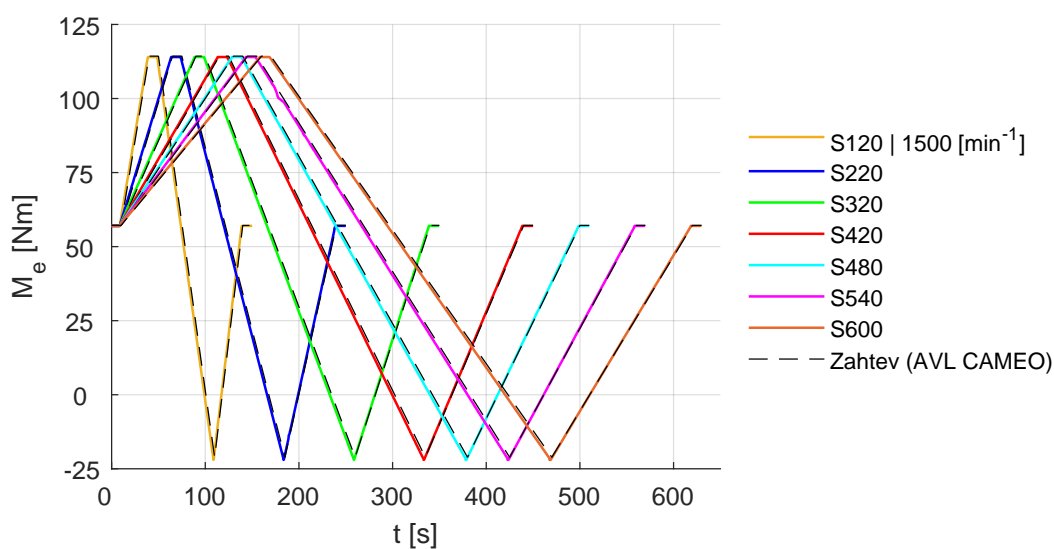
Oznaka dinamičkog testa	Ukupno trajanje nagibne promene [s]	Trajanje pojedinih faza upravljačke sekvence						Ukupno trajanje testa [s]
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	
		[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	
S120	120	10	30	10	60	30	10	150
S220	220	10	55	10	110	55	10	250
S320	320	10	80	10	160	80	10	350
S420	420	10	105	10	210	105	10	450
S480	480	10	120	10	240	120	10	510
S540	540	10	135	10	270	135	10	570
S600	600	10	150	10	300	150	10	630

Tabela 6.1.: Ukupna trajanja dinamičkih testova započelih stacionarnim radnim režimom (SP) [25].

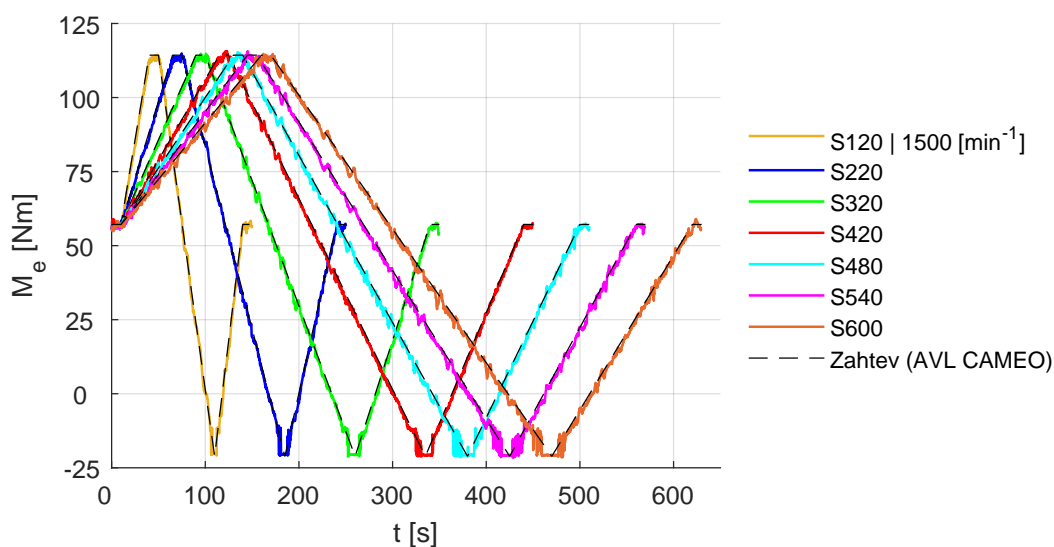
Na slici 6.9 su prikazane teorijske i zahtevane vrednosti upravljačkog parametra formirane posredstvom aplikacije za automatizaciju ispitnog stola za ispitivanja sa SDN različitog trajanja pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Primećuje se relativno dobro poklapanje željene vrednosti efektivnog obrtnog momenta motora zadatim preko softvera AVL CAMEO i vrednosti zahtevanog upravljanja kontrolera kočnice koji je zadužen za regulisanje opterećenja motora u povratnoj sprezi.

Realizovana promena opterećenja za dinamičke testove pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ prikazana je na slici 6.10. Izgled krivih na ovom dijagramu u velikoj meri zavisi od načina filtriranja snimljenog signala. Kako bi se obezbedili dovoljno filtrirani podaci uz minimalno narušavanje dinamike procesa, primenjeno je višestruko filtriranje, i to:

- Filterima sa poketnom sredinom (relativno male veličine bafera) [152] i
- Savitzky–Golay filterima posebno konfigurisanim za svaku mernu veličinu (merni kanal) [153].



Slika 6.9.: Teorijski zahtev u pogledu opterećenja motora (AVL CAMEO) i zahtev za opterećenje motora prosleđen od strane kontrolera kočnice ka EUJ pri sprovođenju testa sa SDN i stacionarnom pripremom (SP) pri 1500 min⁻¹.

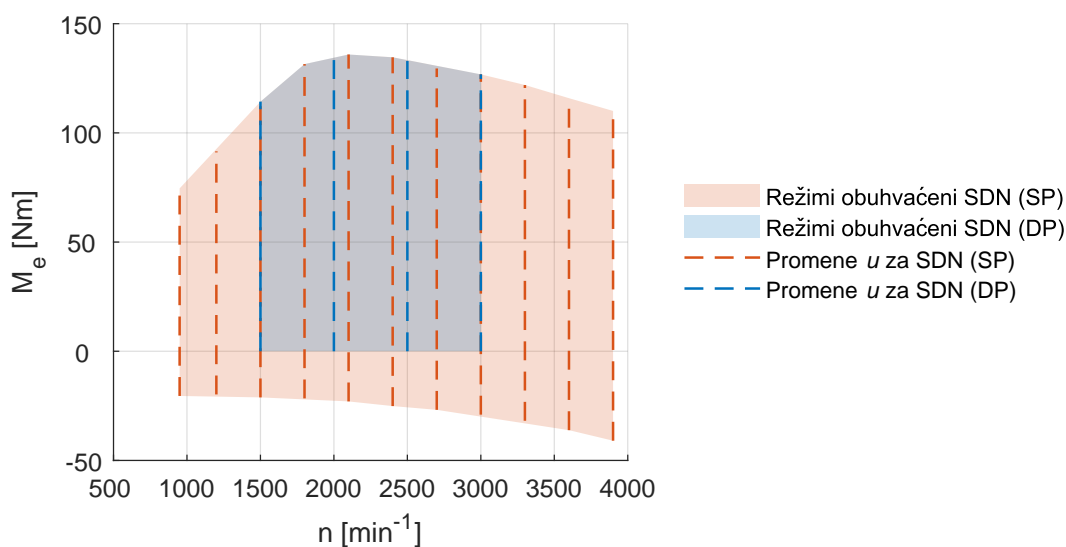


Slika 6.10.: Željena i realizovana promena opterećenja motora za testove sa SDN i stacionarnom pripremom sistema (SP) pri 1500 min⁻¹.

6.3.2. Test sa SDN i dinamičkom pripremom sistema

Ispitivanje manjeg obima izvršeno je za testove sa SDN koji započinju uvođenjem sistema u ponovljive oscilacije (DP) po uzoru na koncept prikazan na slici 6.5.

Ispitivane su karakteristike opterećenja na broju obrtaja motora od 1500 min^{-1} do 3000 min^{-1} sa korakom od po 500 min^{-1} i sa različitim gradijentima nagibine funkcije. Za dati brzinski režim održavan posredstvom kontrolera kočnice i niske vrednosti željenog opterećenja motora, upravljačka jedinica u određenom momentu prekida ubrizgavanje goriva i ulazi u takozvani *fuel cut-off* režim rada, što se vidi na primeru sa slike 6.10. Kako bi se izbegao izostanak sagorevanja u cilindrima motora, jer se time znatno utiče na nelinearnu karakteristiku merenih parametara sistema natpunjenja motora, zahtevano opterećenje je varirano od 0 Nm do maksimalne vrednosti stacionarnog efektivnog obrtnog momenta na datom brzinskom režimu. S obzirom na to da su upravljački parametri redukovano opsega, ovako konfigurisane promene odgovaraju području radnih režima prikazanih na dijagramu 6.11.

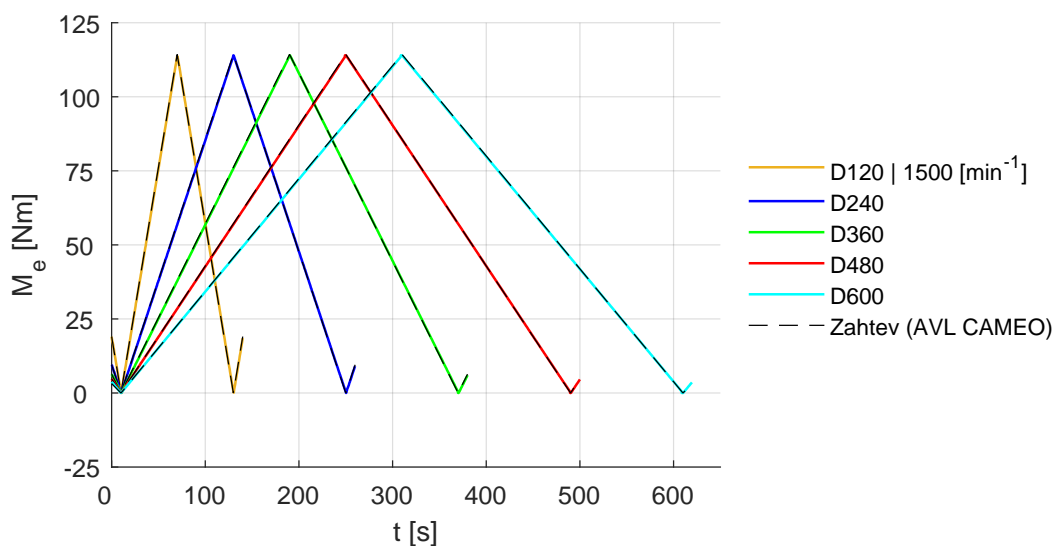


Slika 6.11.: Radni režimi obuhvaćeni dinamičkim ispitivanjem i pravci promene opterećenja pri ispitivanju metodom SDN za stacionarnu i dinamičku pripremu sistema.

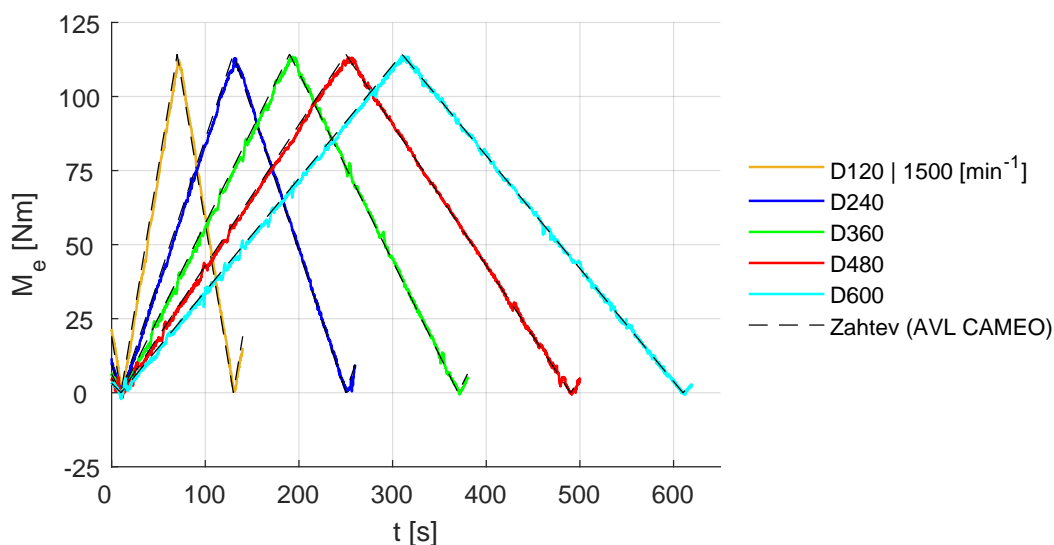
Označavanje i konfiguracija upravljačkih sekvenci prikazana je u tabeli 6.2. Uzorkovanje i smeštanje podataka u datoteke izvršeno je tako da se pre i nakon pune periode promene upravljačkog parametra, započete od minimalne vrednosti, zabeleži po dodatnih 10 s dinamičkog testa. Tako snimljeni podaci omogućavaju proveru vrednosti izlaznih veličina iz prethodne periode pobude. Uvođenje sistema u ponovljive oscilacije izvršeno je pomoću dve pune oscilacije upravljačkog parametra po dinamici planiranog testa pre puštanja poslednje periode tokom koje je izvršeno snimanje podataka. Tako na primer, za sprovođenje eksperimenta sa oznakom D600 bilo je potrebno oko $3 \cdot 600 \text{ s}$, odnosno oko 30 minuta kontinualnog ispitivanja.

Oznaka dinamičkog testa	Ukupno trajanje jednog perioda [s]	Trajanje pojedinih faza upravljačke sekvence				Ukupno trajanje testa [s]
		#1 [s]	#2 [s]	#3 [s]	#4 [s]	
D120	120	10	60	60	10	140
D240	240	10	120	120	10	260
D360	360	10	180	180	10	380
D480	480	10	240	240	10	500
D600	600	10	300	300	10	620

Tabela 6.2.: Konfiguracija testova sa SDN koji započinju dinamičkim radnim režimom (DP).



Slika 6.12.: Teorijski zahtev u pogledu opterećenja motora (AVL CAMEO) i zahtev za opterećenje motora prosleđen od strane kontrolera kočnice ka EUJ pri sprovođenju testa sa SDN i dinamičkom pripremom (DP) pri 1500 min^{-1} .



Slika 6.13.: Željena i realizovana promena opterećenja motora za testove sa SDN i dinamičkom pripremom sistema (DP) pri 1500 min^{-1} .

6.4. Stacionarna aproksimacija dinamičkog odziva

Srednja linija ovojnice dinamičkog odziva linearnog i nelinearnog sistema prvog reda prikazane su na slikama 6.2b i 6.3b. Podaci o temperaturi izduvnih gasova mereni na ulaznom preseku turbine T_{31} , i o pritisku usisnog vazduha merenom na potisnoj strani kompresora P_{21} , poslužiće kao primer za određivanje srednje linije ovojnice i dalju interpretaciju rezultata dinamičkog testa kao funkcije brzinskog režima i gradijenta upravljačkog parametra izraženog kroz informaciju o trajanju testa. Ove dve veličine stanja izduvnog i usisnog gasa izabrane su jer se za njihova merenja koriste različiti tipovi mernih instrumenata, tj.:

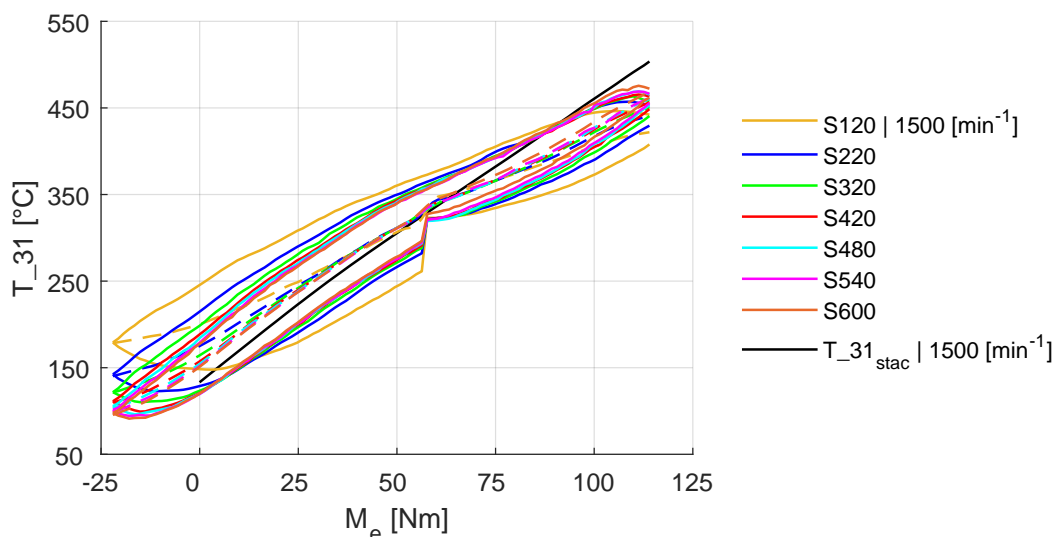
- Merena temperatura izduvnog gasa uslovljena je promenljivim toplotim fluksumom kroz zidove izduvnog sistema i za merenje temperature se koristi termopar koji poseduje znatnu vremensku konstantu, što dodatno povećava vreme stabilizacije merenog signala. Kao posledica navedenog, prisutan je značajan otklon linija ovojnice tokom testa sa SDN;
- Za merenje pritiska korišćeni su relativno brzi piezorezistivni temperaturski kompenzovani senzori pritiska, tako da se postiže relativno dobro poklapanje linija ovojnice merenog signala na uzlaznoj i silaznoj deonici upravljačkog parametra.

Časovna potrošnja goriva je posredno određivana merenjem pritiska hidrostatičkog stuba goriva u mernoj bireti, tako da se merenje ove motorske veličine može smatrati dovoljno brzim. S obzirom na to da je merenje efektivnog obrtnog momenta sastavni deo upravljanja sistemom, moguće je odrediti stacionarnu aproksimaciju specifične efektivne potrošnje goriva na osnovu rezultata dinamičkog ispitivanja. Uporedo sa ostalim relevantnim rezultatima, u sklopu poglavlja 7 analizirana je i specifična efektivna potrošnja goriva.

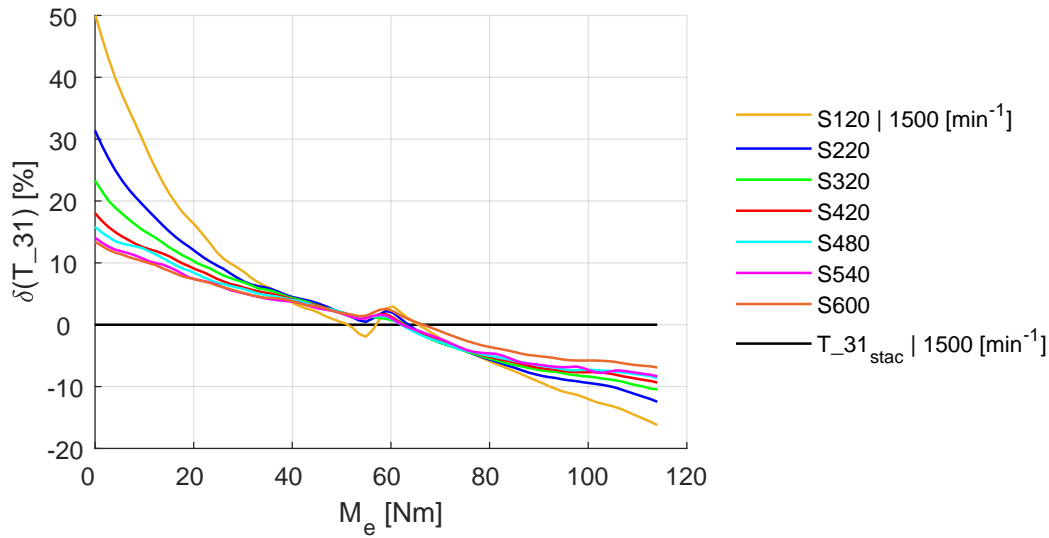
Na slici 6.14 je data promena temperature izduvnog gasa na ulaznom preseku turbine T_{31} , za različite dužine trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Takođe, na ovom dijagramu prikazane su srednje linije ovojnice i vrednosti temperature izduvnog gasa pri stacionarnom ispitivanju po karakteristici opterećenja na datom brzinskom režimu. Primećuje se da se sa povećanjem trajanja dinamičkog testa, srednje linije ovojnice približavaju liniji stacionarnog ispitivanja, što je i očekivano, a relativne razlike određene kao:

$$\delta(T_{31}) = \frac{T_{31}(SDN, n) - T_{31_{stac}}(n)}{T_{32_{stac}}(n)} \quad (6.23)$$

za dati brzinski režim su prikazane na slici 6.15. Uočava se analogija sa podacima prikazanim na slici 6.7 na kojoj su date relativne razlike srednje linije ovojnice i stacionarnog odziva linearnog sistema prvog reda.



Slika 6.14.: Promena temperature T_{31} za različite dužine trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1} .



Slika 6.15.: Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za T_{31} za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1} .

Srednje linije ovojnice, za sve merene veličine, linearno su skalirane uzimajući u obzir blage nejednakosti apsolutnih vrednosti gradijenata za realizovane promene upravljačke veličine tokom dinamičkog testa. Određivanjem gradijenta metodom centralnih razlika, za diskretno uzorkovane vrednosti upravljačke veličine, dobija se korekcionni faktor:

$$F_{grad} = \frac{|\nabla(u)^-|}{|\nabla(u)^- + \nabla(u)^+|} \quad (6.24)$$

gde se oznake $+$ i $-$ odnose na delove upravljačke sekvence sa pozitivnom, odnosno negativnom promenom upravljačkog parametra. Srednja linija ovojnice izlazne veličine, određena aritmetičkom sredinom na uzlaznoj i silaznoj denoici:

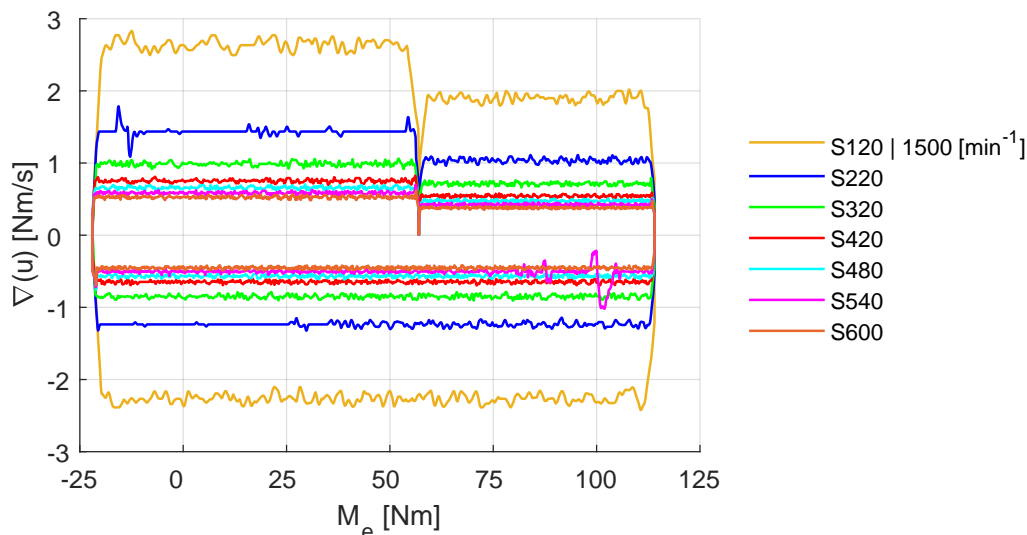
$$y_{sr} = \frac{y^- + y^+}{2} \quad (6.25)$$

uvođenjem korekcionog faktora dobija oblik:

$$y_{sr_grad} = y^- \cdot (1 - F_{grad}) + y^+ \cdot F_{grad} \quad (6.26)$$

Na slici 6.16 prikazane su osrednjene vrednosti gradijenata dinamičke upravljačke sekvence u funkciji realizovane vrednosti upravljačke veličine za testove sa SDN i

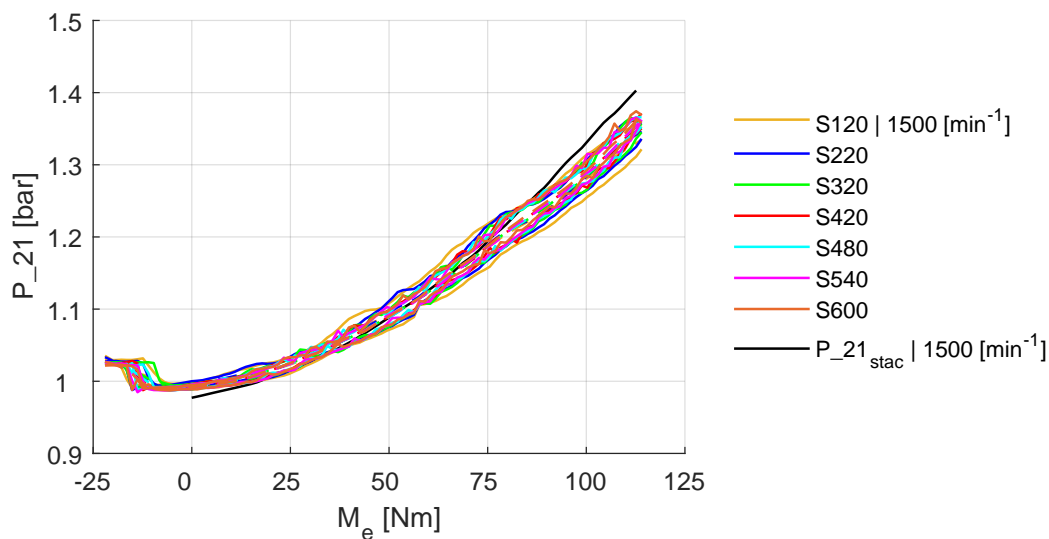
stacionarnom pripremom pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Osrednjavanje je izvršeno primenom filtera sa pokretnom sredinom što rezultuje manjim oscilacijama upravljačkog parametra na deonicama željene konstantne promene i blagim zaobljenjem na mestima promene gradijenta od $\nabla(u)^-$ do $\nabla(u)^+$ i obrnuto.



Slika 6.16.: Osrednjene vrednosti gradijenata dinamičke pobude za test sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1} .

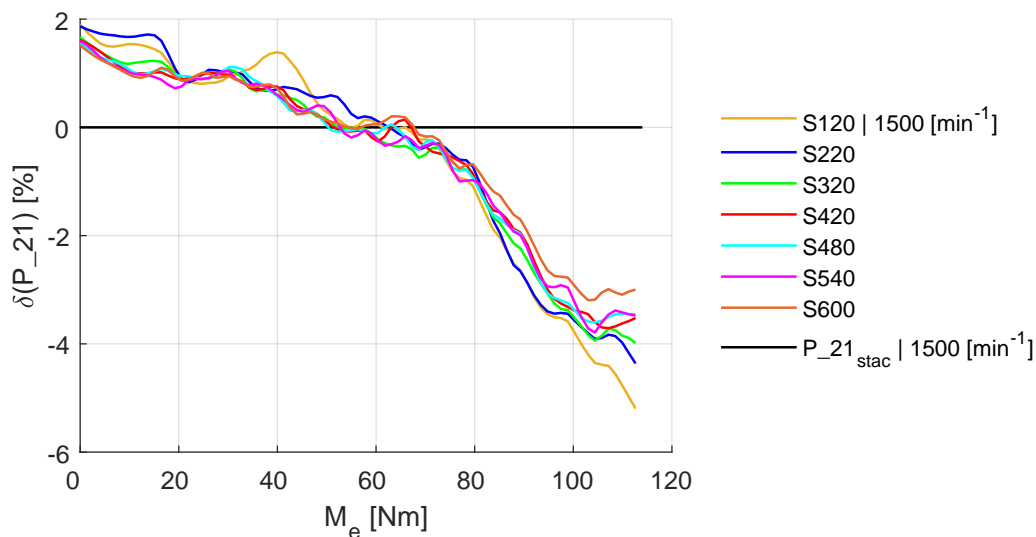
U nastavku su prikazani rezultati dinamičke promene merene veličine za koje je korišćen brži merni lanac i na čiju promenu prenos toplote ima manji uticaj. Kao što je napomenuto, promena parametra P_{21} za stacionarno i dinamičko upravljanje data je na slici 6.17. Analogno prethodnom primeru, i u ovom slučaju je sprovedena stacionarna priprema radnog režima pre pokretanja dinamičkog dela testa.

Vrednosti aproksimacije za stacionarna ispitivanja su redukovana na domen pozitivnog opterećenja iz praktičnih razloga. Naime, stacionarne vrednosti svih merenih veličina zavise od vremena stabilizacije, a režimi motoriranja motora su ispitivani nakon ispitivanja režima maksimalnog opterećenja na datom broju obrtaja motora. Upravo na ovim ekstermnim vrednostima opterećenja su i najveće apsolutne razlike termičkog opterećenja što uslovljava dodatno produženje vremena stabilizacije. Iz tog razloga se tačnost merenih veličina na motoriranim režimima dovodi u pitanje. Takođe, tokom izvođenja dinamičkih ispitivanja, prekid ubrizgavanja goriva na niskim opterećenjima je praćen takvim upravljenjem ventila za EGR koje uslovljava pojavu blagog nadpritisaka u usisnom kolektoru motora (povećani strujni gubici u izduvnom sistemu zbog neefikasnog radnog režima turbopunjača), što se uočava kao svojevrsna nelinearnost prikazana na dijagramu 6.17.



Slika 6.17.: Promena apsolutnog pritiska P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1} .

Relativne razlike stacionarno izmerenog pritiska u usisnom kolektoru i srednjih linija ovojnice za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1} su prikazane na slici 6.18.

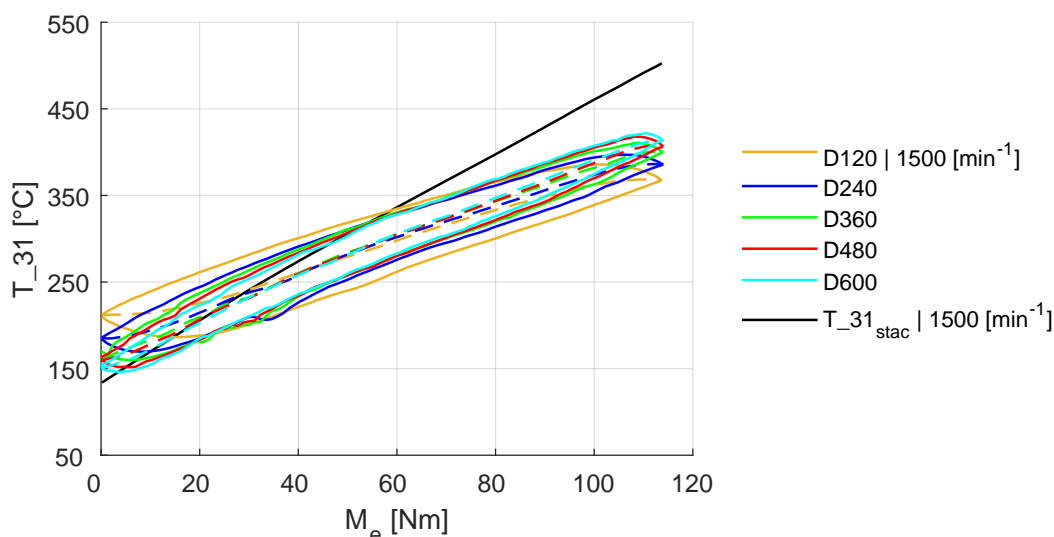


Slika 6.18.: Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i stacionarnom pripremom pri 1500 min^{-1} .

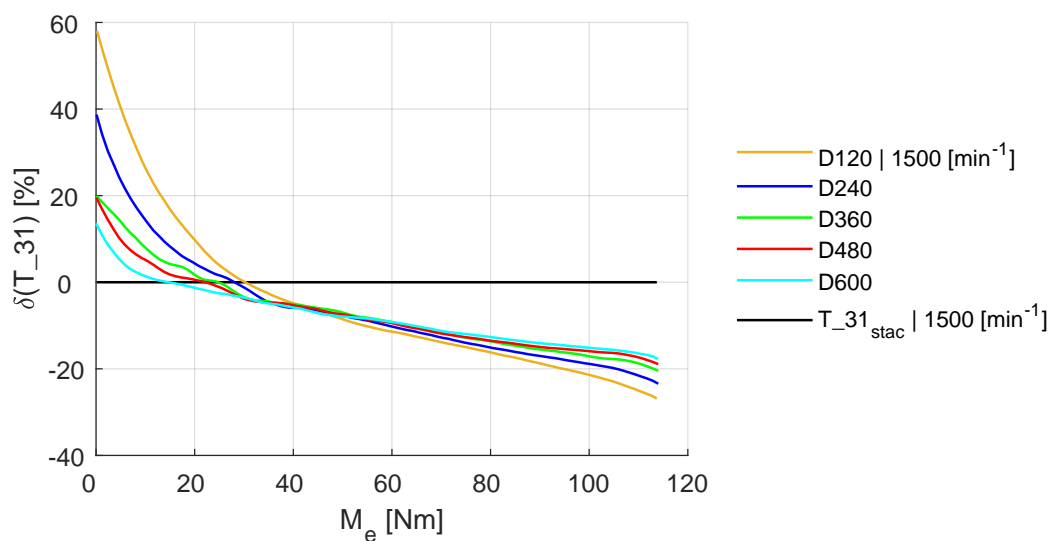
Uočava se relativno dobro poklapanje linija relativne razlike merene veličine nezavisno od trajanja testa sa SDN, što navodi na zaključak da:

- Povećanje tačnosti stacionarne aproksimacije dinamičkih rezultata merenja, odnosno veće poklapanje sa stacionarnim vrednostima, može da se postigne ekstremnim produženjem trajanja testa sa SDN;
- Potencijalnim skraćanjem vremena izvršavanja testa sa SDN mogu da se očekuju rezultati istog kvaliteta za ovu merenu veličinu, s obzirom na relativno malo rasipanje linija relativnih razlika.

Odziv nelinearnog dinamičkog sistema zavisi od početnih uslova. Kroz verziju dinamičkog testa sa dinamičkom pripremom i uvođenjem sistema u ponovljive oscilacije, napravljena je paralela sa dinamičkim ispitivanjem započetim sa stacionarnim režimom. Na slici 6.19 prikazana je promena temperature izduvnih gasova u izduvnom kolektoru motora T_{31} , za testove sa SDN različitog trajanja. S obzirom na to da je reč o veličini čiju dinamičku promenu karakteriše izražena vremenska konstanta, postoji određeno odstupanje uzlaznog i silaznog dela ovojnice. Sa produženjem trajanja dinamičkog testa, srednja linija ovojnice se približava liniji stacionarnih rezultata ispitivanja, što je očekivano. Uvođenje sistema u ponovljive oscilacije (DP), pri konfiguraciji testa sa SDN, doprinosi glatkom obliku krivih relativnog odstupanja srednje linije ovojnice od linije stacionarne karakteristike merene veličine, što je prikazano na slici 6.20.

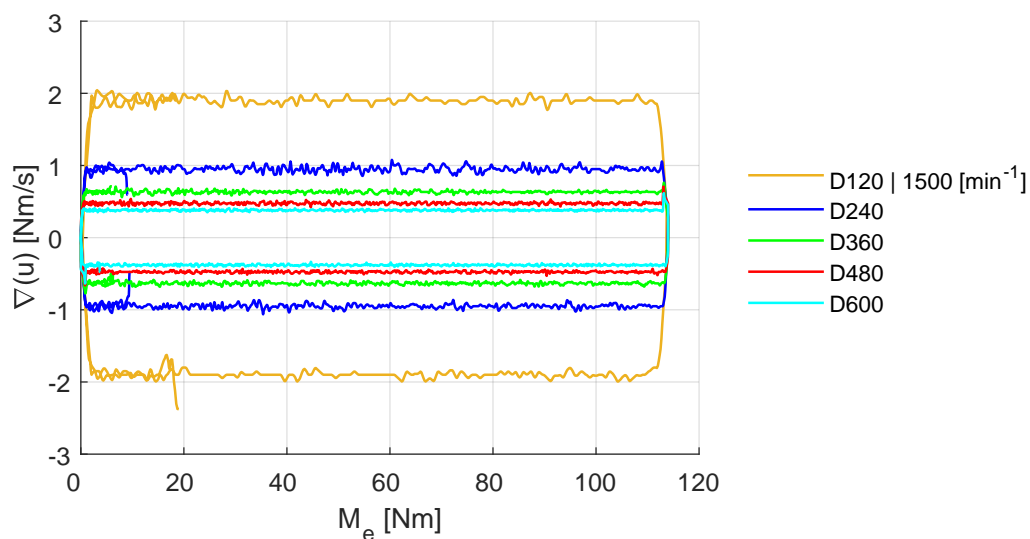


Slika 6.19.: Promena temperature T_{31} za različite dužine trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1} .



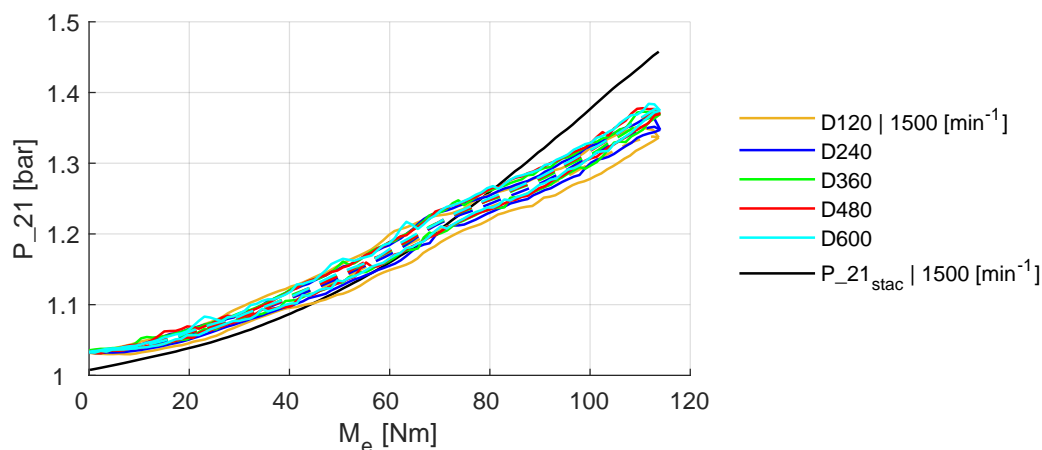
Slika 6.20.: Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za T_{31} za različite dužine trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1} .

Linearna korekcija merene veličine koja uzima u obzir različite apsolutne vrednosti gradijenata pri povećanju i smanjenju vrednosti željenog opterećenja sprovedena je i u slučaju testa sa dinamičkom pripremom sistema. Vrednost korekcinog faktora, izraženog jednačinom 6.24, je u ovom slučaju praktično zanemariva, jer su gradijenti promene upravljačke veličine praktično simetrični, što je prikazano na slici 6.21.

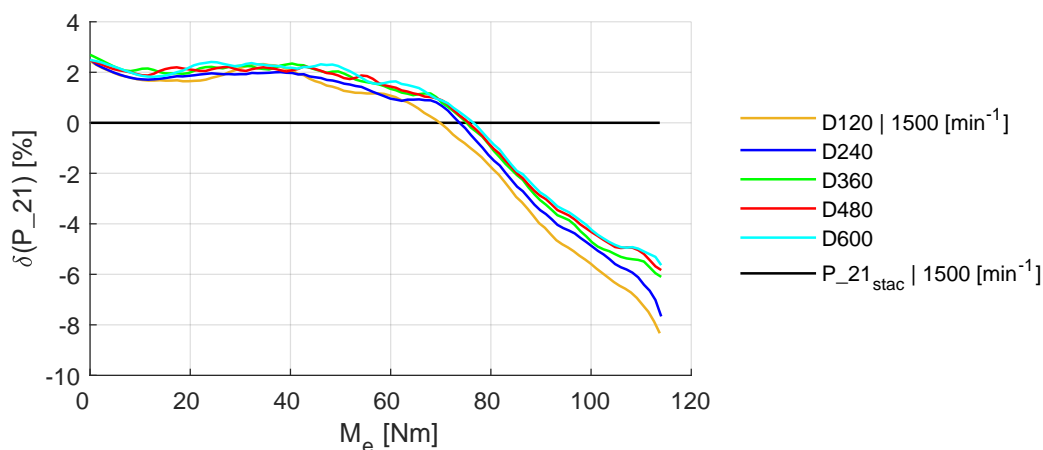


Slika 6.21.: Osrednjene vrednosti gradijenata funkcije pobude pri realizaciji testa sa SDN započetog sa dinamičkog režima pri 1500 min^{-1} .

Analogno promeni prikazanoj na slici 6.17, za ispitivanja sa dinamičkom pripremom sistema, vrednosti pritiska na potisnoj strani kompresora za različite gradijente promene opterećenja motora pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ prikazane su na slici 6.22. Fizikalnost procesa i karakteristika mernog lanca da dovoljno brzo reaguje na promenu upravljačkog parametra dovode do približno jednakih vrednosti relativne razlike srednje linije ovojnice u odnosu na stacionarno ispitivanje, kao što potvrđuje dijagram 6.23. Za posmatrani parametar, najveće razlike u funkciji trajanja testa sa SDN uočavaju se na višim opterećenjima za dati brzinski režim. S obzirom na to da je u pitanju turbonatpunjeni motor, svako „kašnjenje” porasta temperature u izduvnom sistemu direktno utiče i na brzinu porasta entalpije izduvnih gasova, a od energije izduvnih gasova zavisi količina energije koja će se posredstvom turbinškog kola preneti kompresorskom kolu, što se dalje odražava na vrednosti parametra P_{21} .



Slika 6.22.: Promena apsolutnog pritiska P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1} .



Slika 6.23.: Relativna razlika između srednje linije ovojnice i stacionarnih vrednosti za P_{21} za različita trajanja testa sa SDN i dinamičkom pripremom pri 1500 min^{-1} .

6.5. Analiza parametara ovojnice odziva pri SDN

Pri konfigurisanju eksperimenta sa SDN neophodno je definisati nagibnu funkciju, tj. odrediti ukupno vreme trajanja testa za dati opseg upravljačkih veličina. U prethodnom poglavlju prikazani su karakteristični odzivi motorskih veličina za različite konfiguracije testa sa SDN i važi opšti zaključak da se sa produženjem eksperimenta dobijaju rezultati približniji stacionarnom odzivu. S obzirom na to da je cilj napraviti test koji će dati dovoljno kvalitetne podatke uz što kraće vreme ispitivanja, u nastavku će biti analizirane osnovne karakteristike ovojnice dinamičkih odziva sistema. Ova analiza trebalo bi da pruži uvid i osnovne preporuke o poželjnom trajanju eksperimenta, kao funkcije merenja različitih veličina procesa (temperatura, pritiska, indikatorskih parametara) i brzinskog režima motora.

S obzirom da eksperiment sa SDN može da se završi za nekoliko minuta, preduslov za dalju analizu je ignorisanje informacija o stacionarnim karakteristikama posmatranog sistema. Kako bi se dobio opšti rezultat analize, svi kanali (i upravljački i dinamički odzivi) normalizovani su svodenjem na opseg od 0 do 1. Amplitudna normalizacija posmatranih kanala je posledica sledećih pretpostavki:

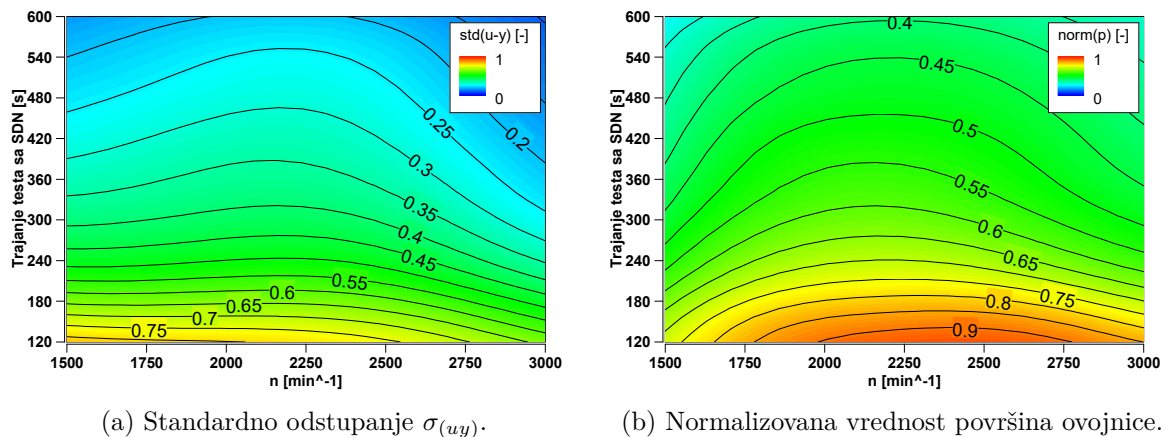
- Ukoliko se odziv sistema posmatra kao odziv nelinearnog sistema prvog reda (ili generalno stabilnog sistema) sa monotono rastućom stacionarnom aproksimacijom kao funkcijom upravljačkog parametra u , za krajnje normalizovane vrednosti upravljanja i izlazne veličine važi:

$$u = 0 \Rightarrow y(u) = 0, u = 1 \Rightarrow y(u) = 1 \quad (6.27)$$

- Ukoliko sistem ima dovoljno brz odziv, linija ovojnice pri porastu i smanjenju upravljačke veličine ne bi trebala da ima značajan otkon, tako da će za različita trajanja eksperimenta standardno odstupanje razlike normalizovane ulazne i izlazne veličine biti konstantno, odnosno:

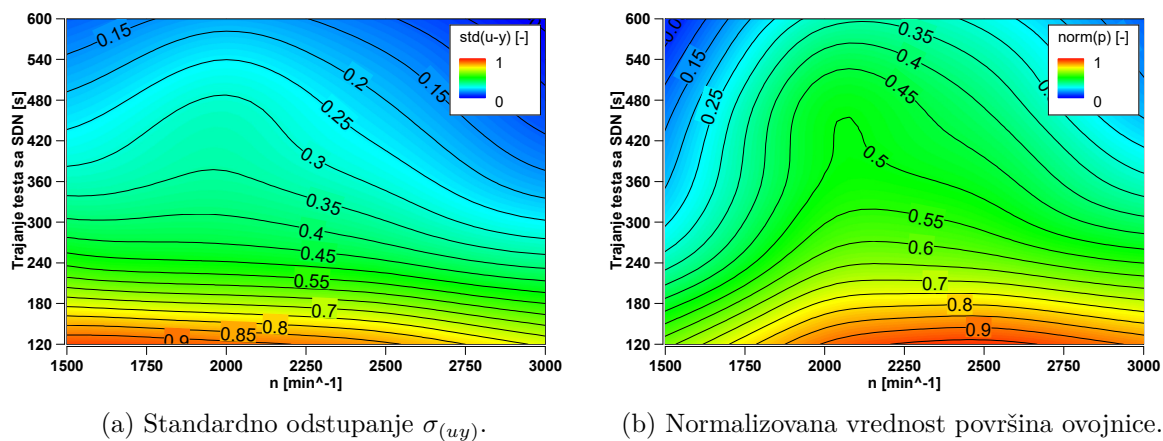
$$\sigma_{(uy)} = \text{std}(\text{norm}(u) - \text{norm}(y)) \quad (6.28)$$

Na slici 6.24a je data promena $\sigma_{(uy)}$ temperature izduvnih gasova T_{31} kao funkcija trajanja testa sa SDN i brzinskog režima motora. Sa produženjem trajanja eksperimenta smanjuje se $\sigma_{(uy)}$ što je i očekivano, ali se uočava da je na višim brojevima obrtaja pad ovog parametra intenzivniji što je posledica efikasnijeg mehanizma prenošenja toplote sa izduvnog gasa na senzor. Time se postiže efekat povećanja brzine odziva posmatranog sistema čiji je sastavni deo spregnuti merni lanac. Paralelno sa ovim prikazom, na slici 6.24b data je normalizovana površina ovojnice posmatrane temperature. Podaci se odnose na test sa SDN sa stacionarnom pripremom.



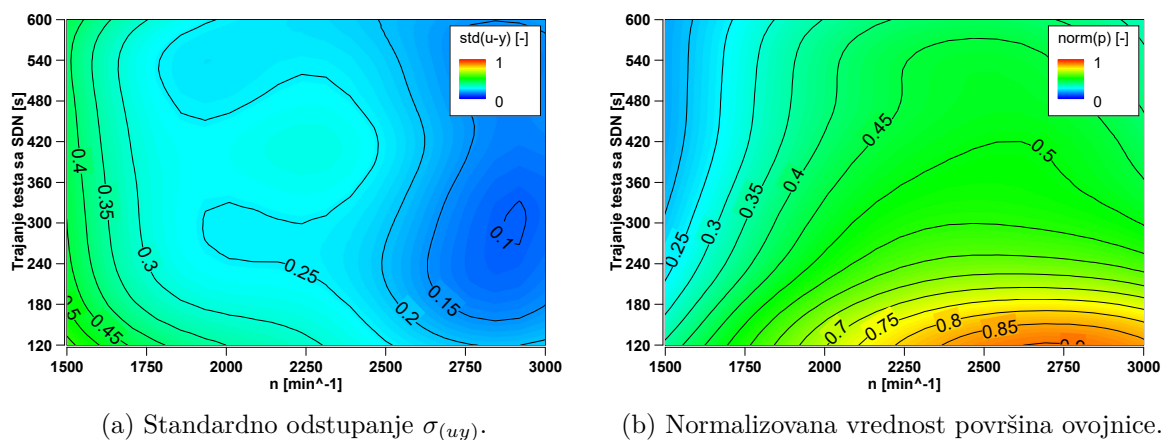
Slika 6.24.: Parametri ovojnice temperature izduvnih gasova T_{31} za ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema.

Parametari ovojnice pri merenju temperature izduvnih gasova T_{31} mogu da se odrede i za testove za dinamičkom pripremom sistema. Na slici 6.25a je data promena $\sigma_{(uy)}$ i uočava se sličan trend, s tim što se i na nižim brojevima obrtaja jasnije uočavaju testovi sa SDN suviše blagog gradijenta, odnosno predugog trajanja. To potvrđuje normalizovana površina ovojnice temperature T_{31} prikazana na slici 6.25b. Sa smanjenjem broja obrtaja motora, u načelu, su manje amplitude izlaznih veličina za pun opseg opterećenja u poređenju sa višim brzinskim režimom. Iz tog razloga je opravdano skratiti trajanje testa sa SDN na nižim brojevima obrtaja.



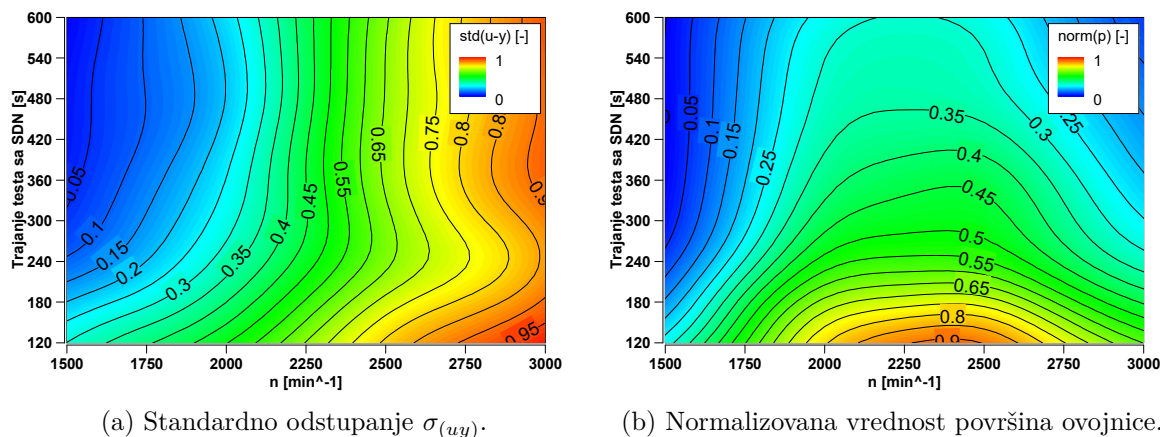
Slika 6.25.: Parametri ovojnice temperature izduvnih gasova T_{31} za ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema.

Ukoliko se analizira ovojnica mernog signala znatno bržeg odziva, kao što je to ovojnica pritiska u usisnom kolektoru motora P_{21} , primetan je nešto drugačiji trend. Na slici 6.26a uočava se dominantna zavisnost parametra $\sigma_{(uy)}$ od brzinskog režima u odnosu na prethodni slučaj gde je trajanje testa sa SDN diktiralo glavni trend. S obzirom na to da su promene relativno male, nije moguće formirati jasan zaključak za ove brzinske režime i data trajanja eksperimenta sa SDN. Nešto jasniji uticaj konfiguracije testa je primetan na slici 6.26b. Sa smanjenjem broja obrtaja motora mogu da se očekuju dovoljno kvalitetni rezultati i sa bržim testom sa SDN, odnosno makar rezultati koji bi bili na nivou nešto dužeg testa na višem broju obrtaja. Ovakva promena normalizovane površine ovojnice posmatranog parametra posledica je generalno manjeg apsolutnog otklona izlazne veličine u poređenju sa rezultatima na većem broju obrtaja.



Slika 6.26.: Parametri ovojnice pritiska u usisnom kolektoru P_{21} za ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema.

Ukoliko se analiziraju karakteristike ovojnice merene veličine bržeg odziva i pobe sa SDN i dinamičkom pripremom, dobijaju se dijagrami prikazani na slici 6.27. Kao posledica glatkog toka posmatranog odziva za vreme dinamičkog testa dobija se očekivana promena vrednosti parametra $\sigma_{(uy)}$ za ovojnicu toka pritiska P_{21} . Manje amplitude odziva na nižem broju obrtaja dozvoljavaju kraći test sa SDN što se primećuje i na dijagramu promene normalizovane površine ovojnice.

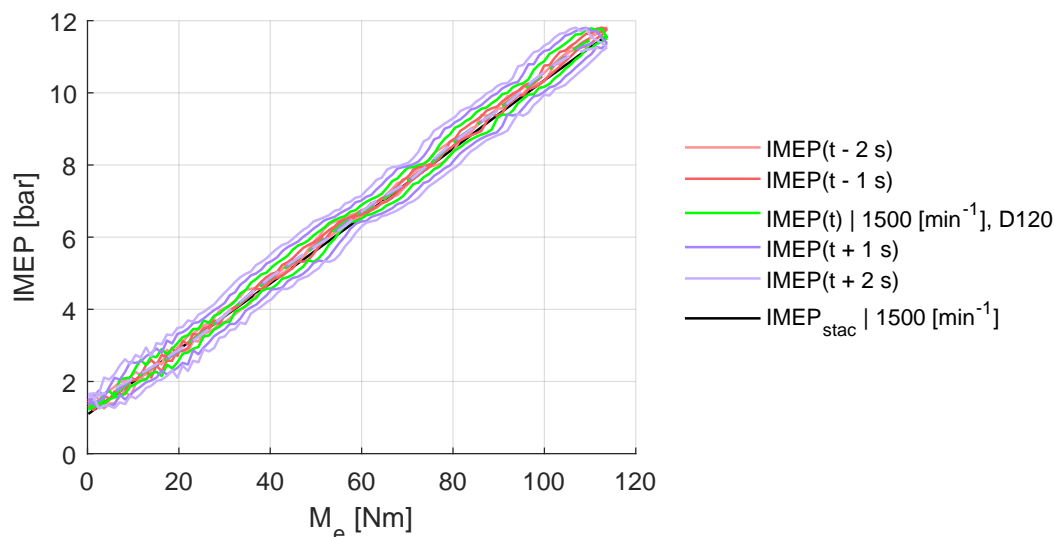


Slika 6.27.: Parametri ovojnice pritiska u usisnom kolektoru P_{21} za ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema.

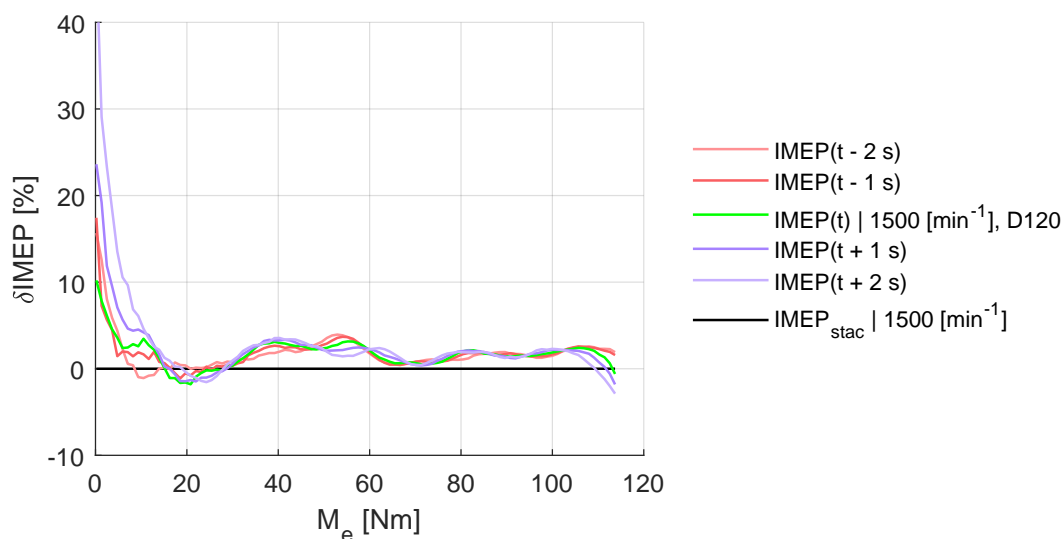
Tokom ispitivanja motora korišćene su nezavisne akvizicione platforme za uzorkovanje podataka u vremenskom i ugaonom domenu, kao što je opisano u poglavljima 5.1 i 5.2. Iako je pokretanje akvizicije tokom dinamičkih ispitivanja na ove dve platforme kontrolisano od strane aplikacije za automatizaciju ispitivanja, sprovedeno je dodatno usklađivanje snimljenih signala. Tok efektivnog obrtnog momenta u vremenskom domenu, poslužio je kao referentni signal za određivanje fazne korekcije toka signala srednjeg indiciranog pritiska (eng.: *IMEP - Indicated Mean Effective Pressure*). Veza i prebacivanje indikatorskih parametara u vremenski domen je jednoznačna jer je na ciklusnoj osnovi beleženo trajanje svakog pojedinačnog ciklusa.

Faziranje toka indikatorskog pritiska uslovljeno je minimalnom vrednošću srednjeg kvadratnog odstupanja razlike normalizovanog srednjeg indikatorskog pritiska i normalizovanog efektivnog obrtnog momenta za ukupno trajanje pojedinačnih dinamičkih testova. Na slici 6.28 prikazan je oblik ovojnice za usklađen IMEP i za ciljano smaknute signale (-2, -1, 1 i 2 sekunde). S obzirom na to da su dinamički testovi relativno dugački (do 600s), pogrešna vremenska sinhronizacija nema veliki uticaj na širem području upravljačkog parametra. Za navedeni primer, na slici 6.29, prikazana je relativna razlika srednjeg indikatorskog pritiska određenog srednjom

linijom ovojnice i rezultata indiciranja na stacionarnim režimima. Primećuje se da preciznost vremenske sinhronizacije ima najveći uticaj u području niskih apsolutnih vrednosti merenog parametra, tj. na niskim opterećenjima motora.



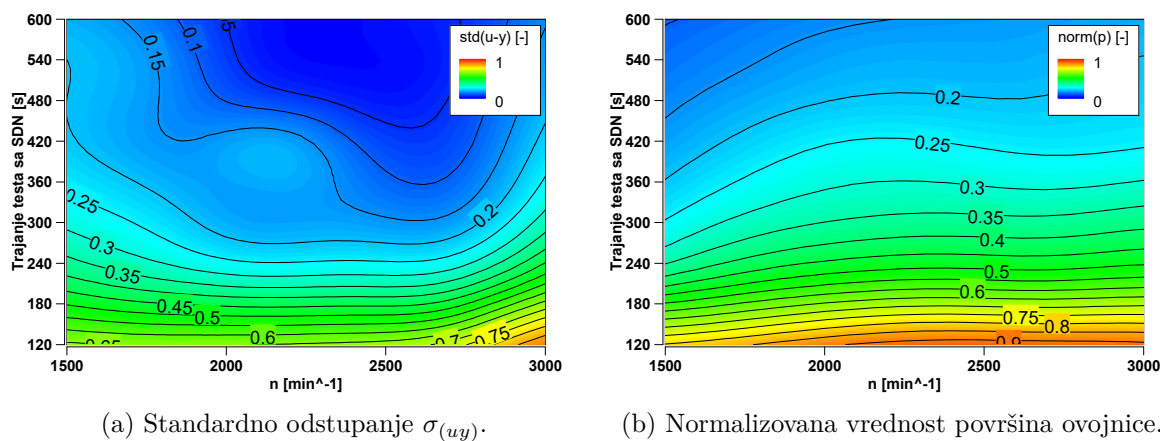
Slika 6.28.: Oblik ovojnice srednjeg indikatorskog pritiska (IMEP) za različite vrednosti otklona vremenskog domena indiciranih kanala za dinamički test D120 pri 1500 min^{-1} .



Slika 6.29.: Relativne razlike srednje linije ovojnice u odnosu na stacionarni IMEP za različite vrednosti otklona vremenskog domena indiciranih kanala za test D120 pri 1500 min^{-1} .

Ukoliko je broj obrtaja motora konstantan, veza između srednjeg indikatorskog pritiska i ostvarenog efektivnog obrtnog momenta je direktna, a apsolutne razlike

zavise od trenutne vrednosti mehaničkih gubitaka. Iako je efektivni obrtni moment nezavisna promenljiva pri analizi oblika ovojnice, opravdano se očekuje nulti otklon indikatorskog pritiska na uzlaznoj i silaznoj rampi dinamičke sekvence. Ipak određeni otklon postoji usled uticaja dinamike upravljanja na veličinu mehaničkih gubitaka (termička inercija, promenljiv protok motorskih fluida, inercija turbokompresorske grupe itd.) što je prikazano analizom parametra $\sigma_{(uy)}$ i veličinom normalizovane površine ovojnice na slikama 6.30a i 6.30b za sinhronizovane vremenske domene. Oba dijagrama ukazuju da se sa produženjem sekvence SDN povećava tačnost indikatorskih parametara bez obzira na brzinski režim motora. Slični podaci se dobijaju za obe vrste pripreme dinamičkog testa.



Slika 6.30.: Parametri ovojnice srednjeg indiciranog pritiska u funkciji brzinskog režima i trajanja testa sa SDN.

7. Rezultati dinamičkog ispitivanja motora metodom SDN

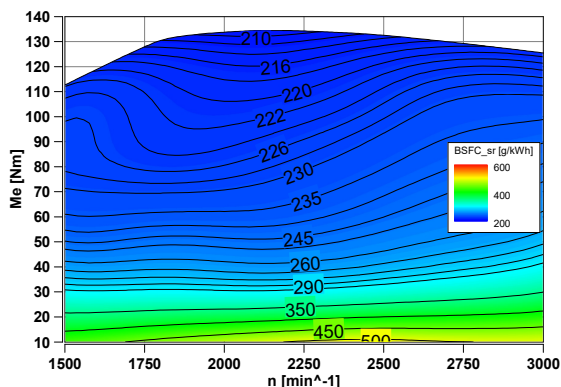
Postavka eksperimenta i primeri karakterističnih dinamičkih odziva merenih veličina prikazani su u prethodnom poglavlju. S obzirom na količinu podataka, dati primeri su se uglavnom odnosili na sekvence sa SDN ispitivane pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ za različite načine pripreme sistema i za različite nagibe rampi. U nastavku će biti prikazani i prokomentarisani najznačajniji rezultati ispitivanja metodom SDN za opseg broja obrtaja KV od 1500 min^{-1} do 3000 min^{-1} .

7.1. Stacionarne aproksimacije rezultata sa SDN

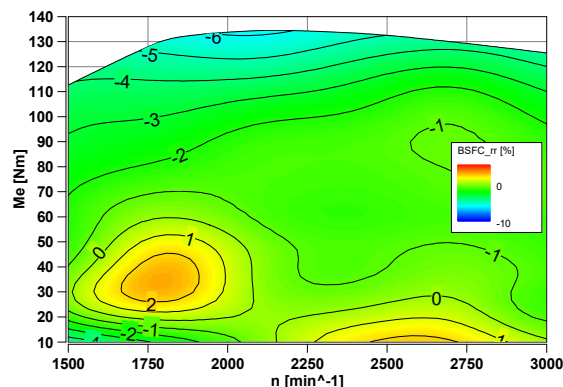
U tabeli 7.1 je data je lista univerzalnih dijagrama određenih merenih veličina koji odgovaraju dinamičkom testu sa stacionarnom i dinamičkom pripremom. Takođe, prikazani su rezultati najkraćeg, srednjeg i najdužeg testa sa SDN. Radi boljeg poređenja, izabrana je konfiguracija S420, jer nju karakteriše veća amplituda promene upravljačke veličine (test sa SDN zalazi u oblast negativnog obrtnog momenta) pa su i gradijenti promene upravljačke veličine slični kao na testu sa oznakom D360.

Merena veličina:		BSFC	T_31	T_41	P_21
Dinamički testovi sa stacionarnom pripremom	S120	sl. 7.1a	sl. 7.3a	sl. 7.5a	sl. 7.7a
	S420	sl. 7.1c	sl. 7.3c	sl. 7.5c	sl. 7.7c
	S600	sl. 7.1e	sl. 7.3e	sl. 7.5e	sl. 7.7e
Dinamički testovi sa dinamičkom pripremom	D120	sl. 7.2a	sl. 7.4a	sl. 7.6a	sl. 7.8a
	D360	sl. 7.2c	sl. 7.4c	sl. 7.6c	sl. 7.8c
	D600	sl. 7.2e	sl. 7.4e	sl. 7.6e	sl. 7.8e

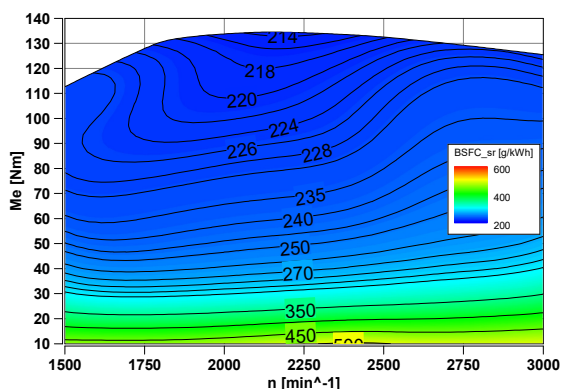
Tabela 7.1.: Lista univerzalnih dijagrama na kojima je prikazan deo rezultata dinamičkog ispitivanja.



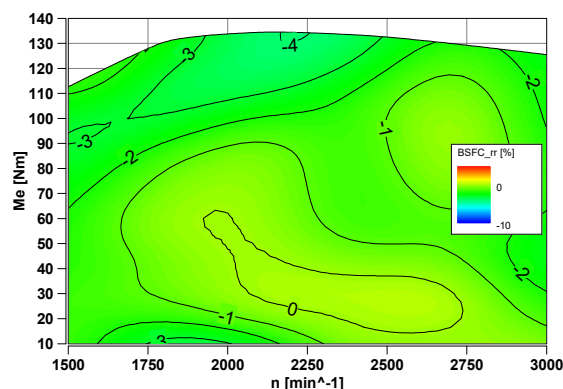
(a) Specifična efektivna potrošnja goriva (S120).



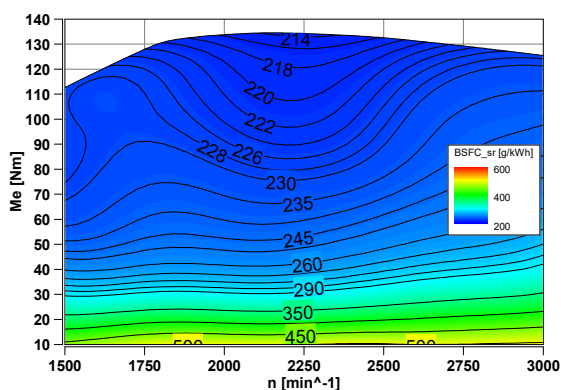
(b) Relativna razlika SDN/stac (S120).



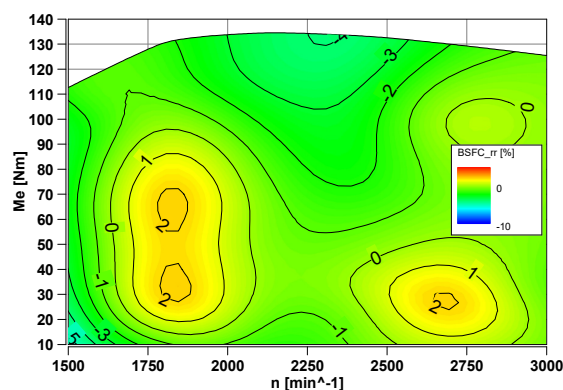
(c) Specifična efektivna potrošnja goriva (S420).



(d) Relativna razlika SDN/stac (S420).

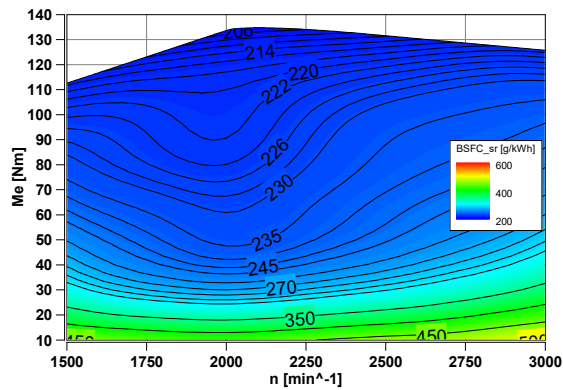


(e) Specifična efektivna potrošnja goriva (S600).

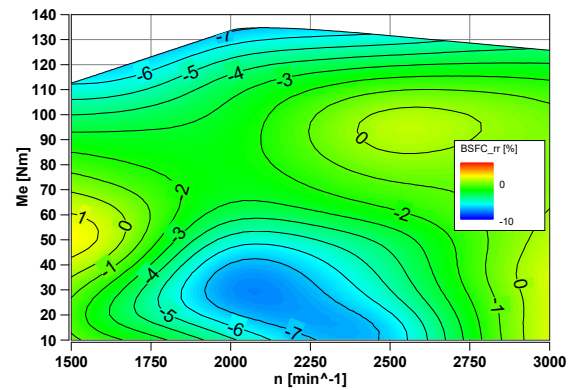


(f) Relativna razlika SDN/stac (S600).

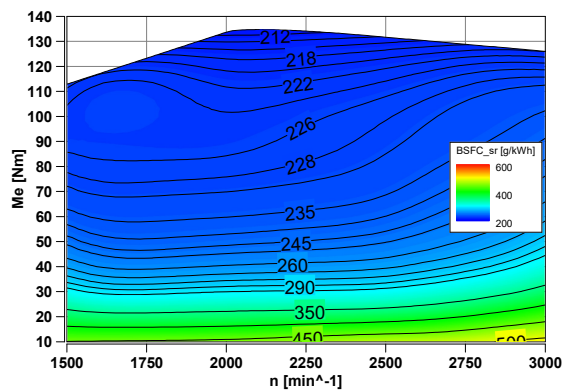
Slika 7.1.: Specifična efektivna potrošnja goriva (BSFC) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.



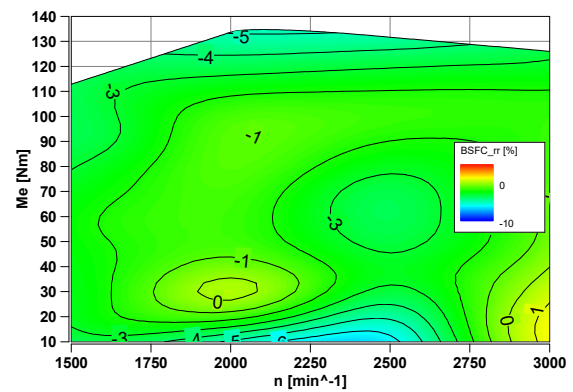
(a) Specifična efektivna potrošnja goriva (D120).



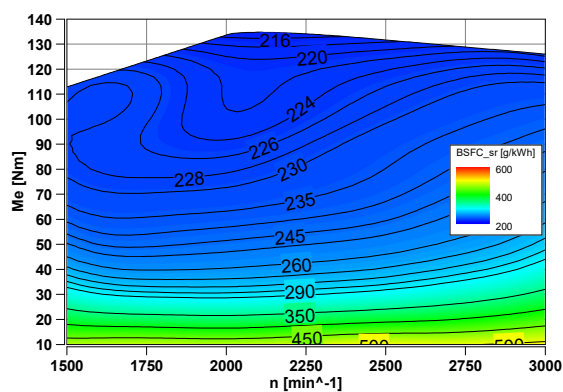
(b) Relativna razlika SDN/stac (D120).



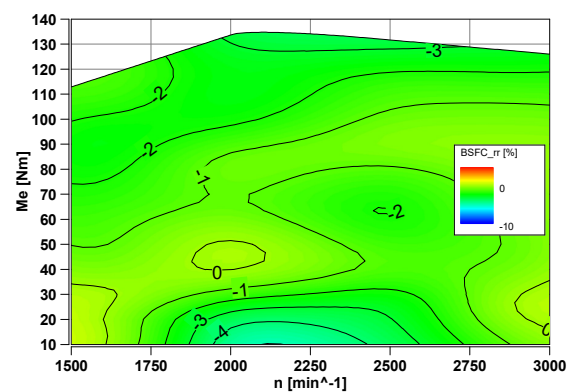
(c) Specifična efektivna potrošnja goriva (D360).



(d) Relativna razlika SDN/stac (D360).

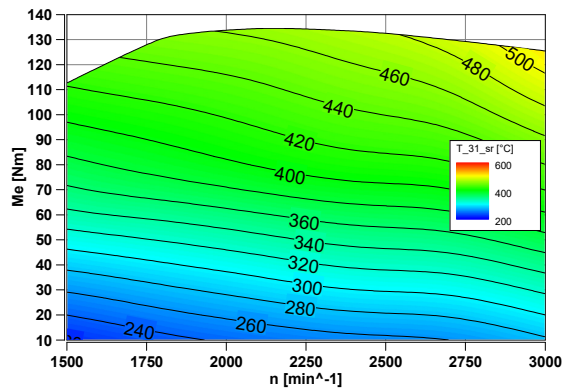
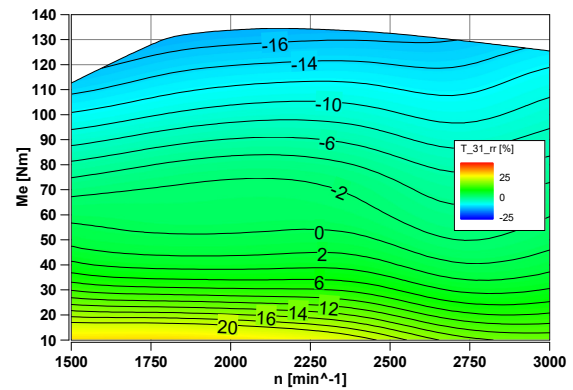


(e) Specifična efektivna potrošnja goriva (D600).

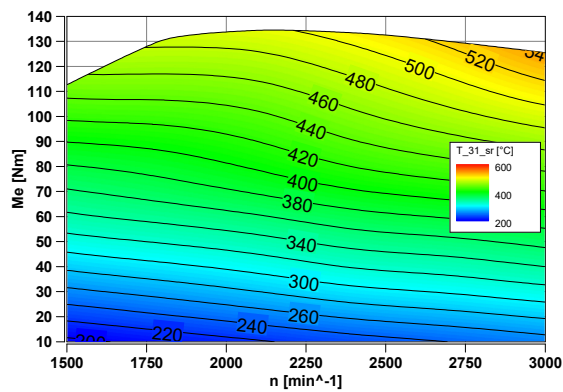
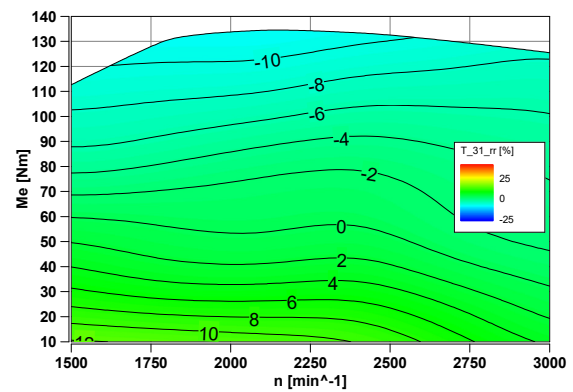


(f) Relativna razlika SDN/stac (D600).

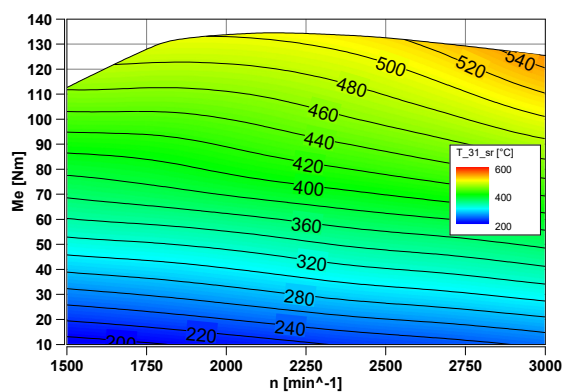
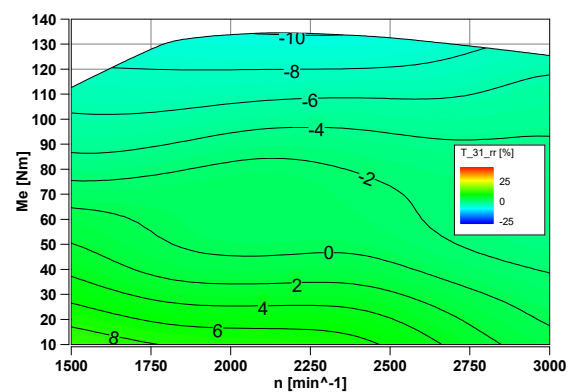
Slika 7.2.: Specifična efektivna potrošnja goriva (BSFC) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.

(a) Temperatura T_{31} (S120).

(b) Relativna razlika SDN/stac (S120).

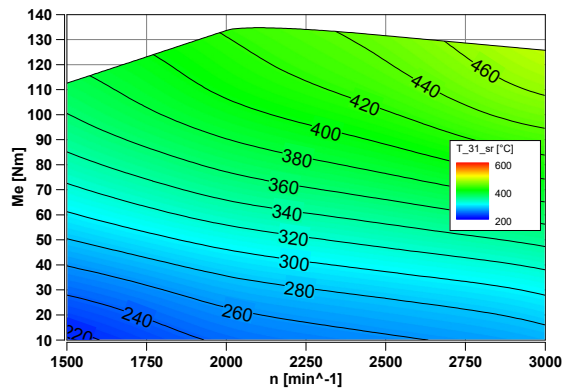
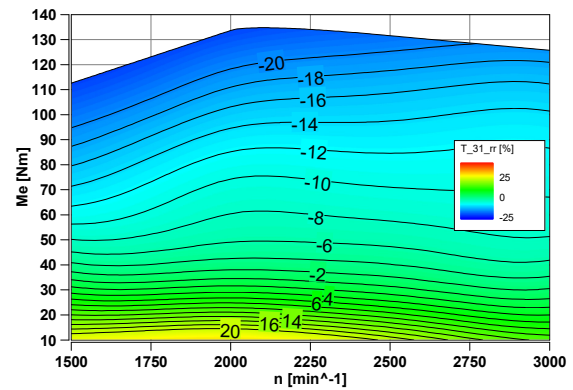
(c) Temperatura T_{31} (S420).

(d) Relativna razlika SDN/stac (S420).

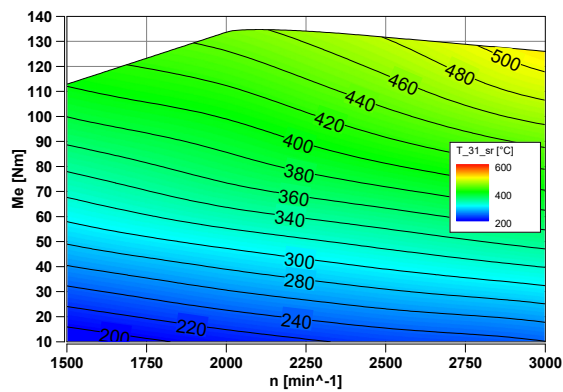
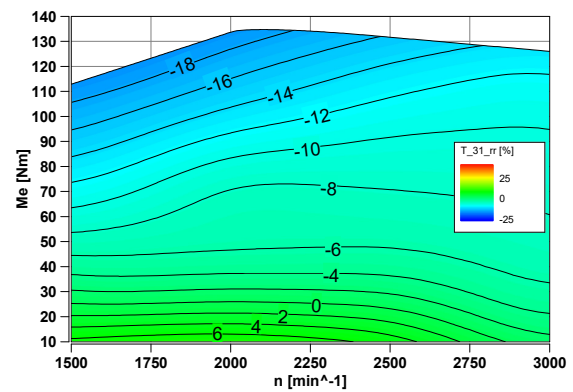
(e) Temperatura T_{31} (S600).

(f) Relativna razlika SDN/stac (S600).

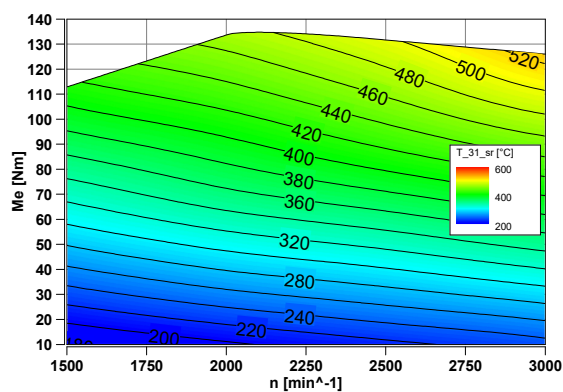
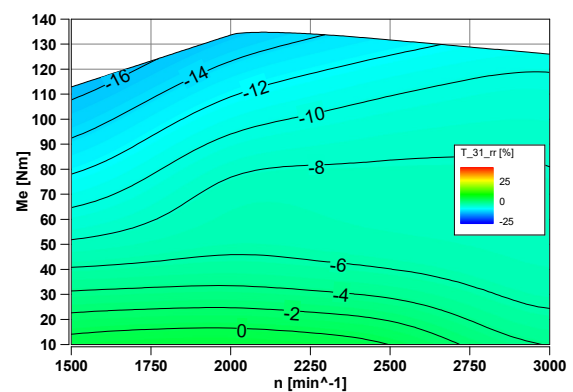
Slika 7.3.: Temperatura izduvnih gasova u izduvnom kolektoru (T_{31}) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.

(a) Temperatura T_{31} (D120).

(b) Relativna razlika SDN/stac (D120).

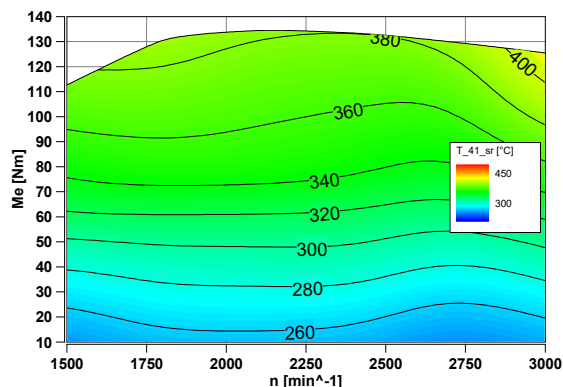
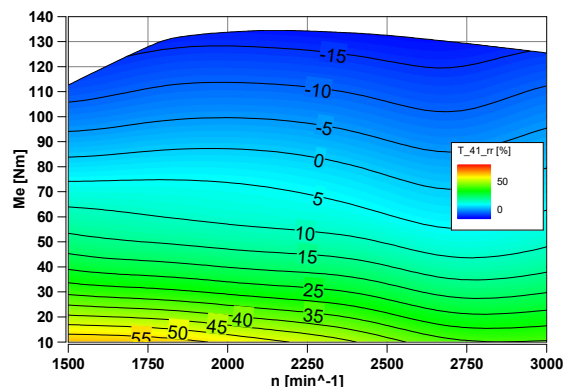
(c) Temperatura T_{31} (D360).

(d) Relativna razlika SDN/stac (D360).

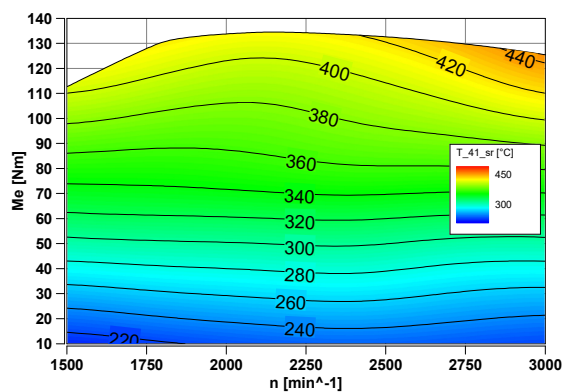
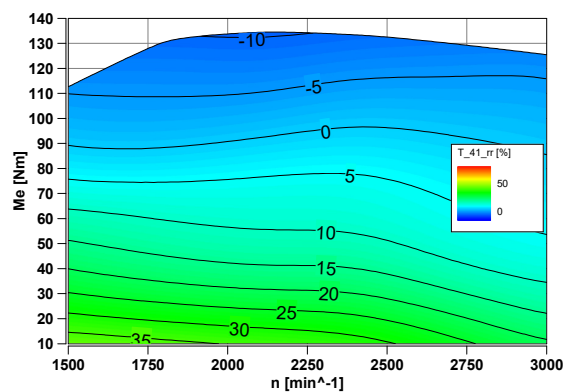
(e) Temperatura T_{31} (D600).

(f) Relativna razlika SDN/stac (D600).

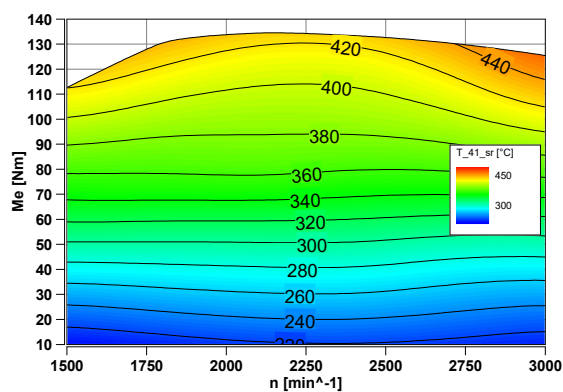
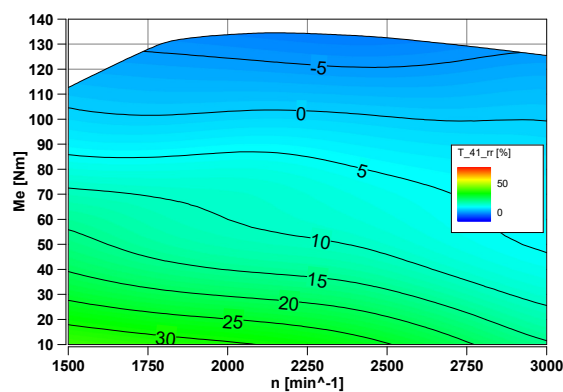
Slika 7.4.: Temperatura izduvnih gasova u izduvnom kolektoru (T_{31}) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.

(a) Temperatura T_{41} (S120).

(b) Relativna razlika SDN/stac (S120).

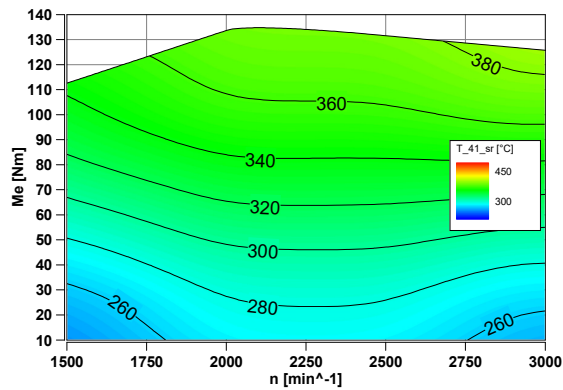
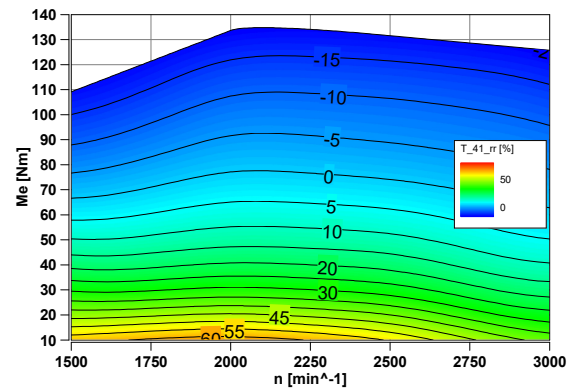
(c) Temperatura T_{41} (S420).

(d) Relativna razlika SDN/stac (S420).

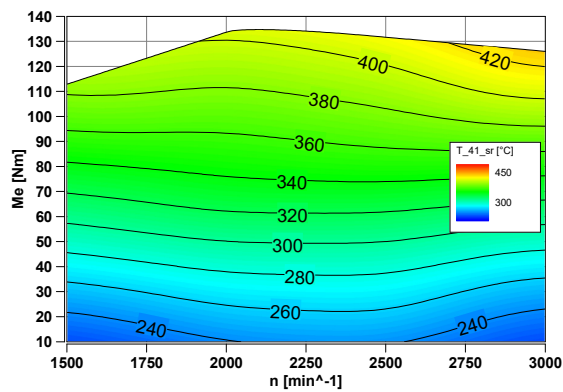
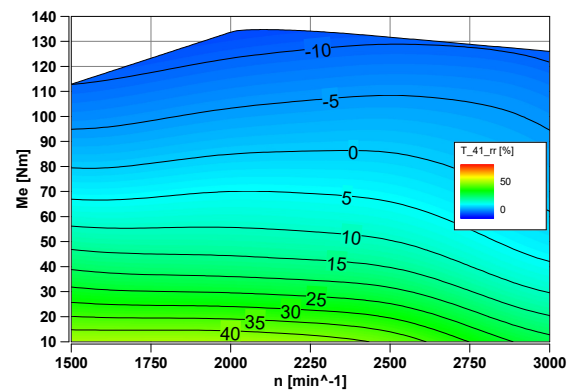
(e) Temperatura T_{41} (S600).

(f) Relativna razlika SDN/stac (S600).

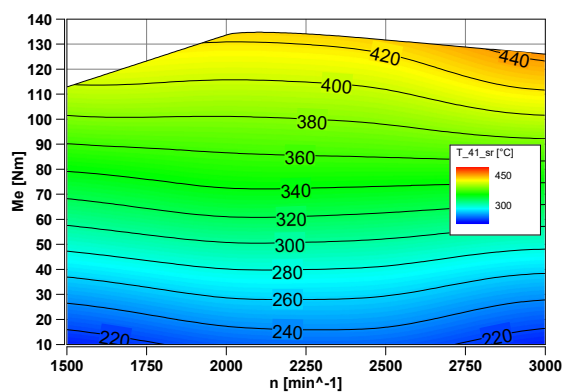
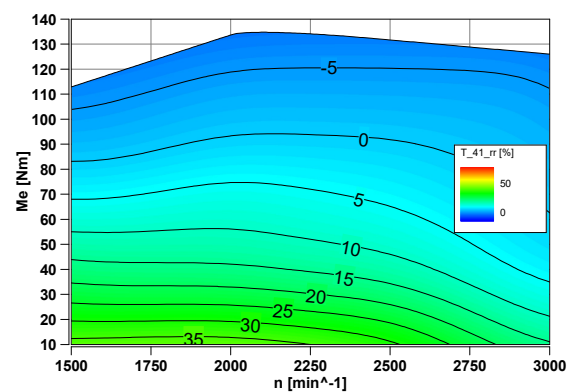
Slika 7.5.: Temperatura izduvnih gasova izmerenih iza turbine (T_{41}) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.

(a) Temperatura T_{41} (D120).

(b) Relativna razlika SDN/stac (D120).

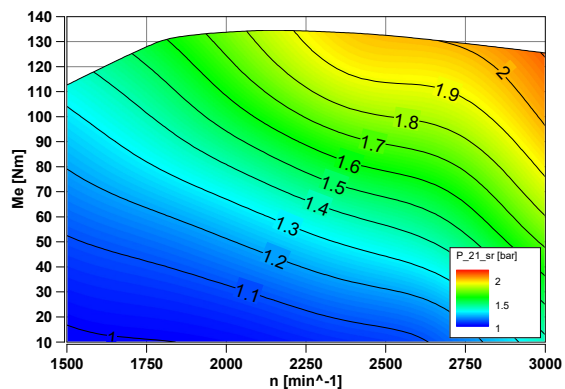
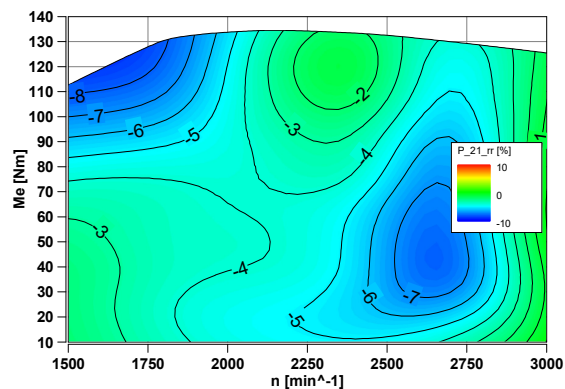
(c) Temperatura T_{41} (D360).

(d) Relativna razlika SDN/stac (D360).

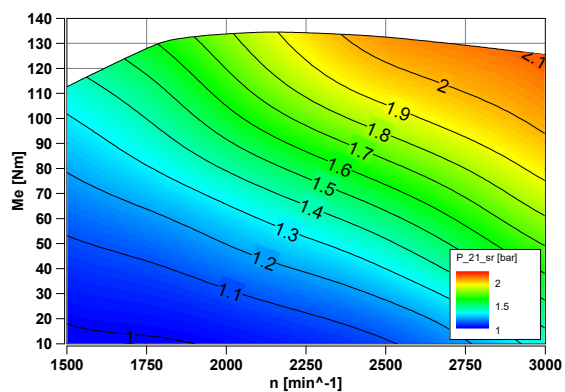
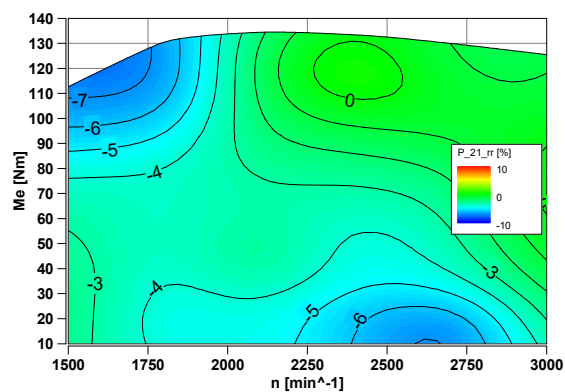
(e) Temperatura T_{41} (D600).

(f) Relativna razlika SDN/stac (D600).

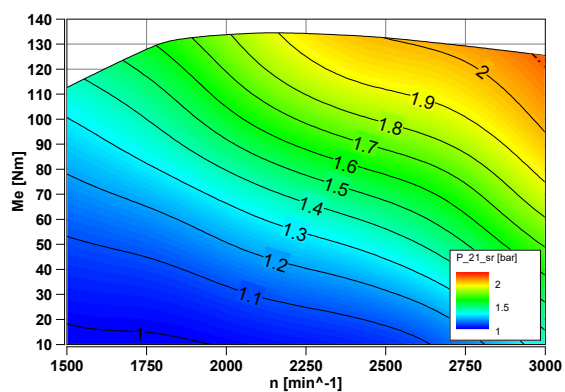
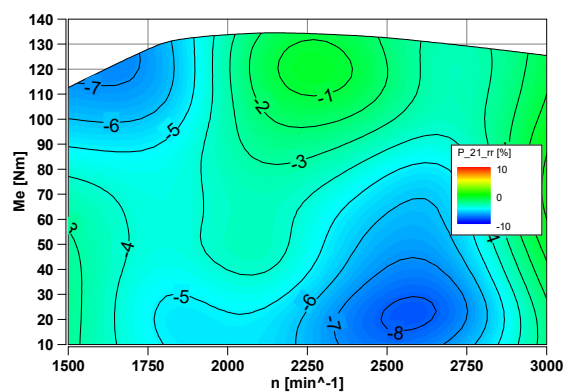
Slika 7.6.: Temperatura izduvnih gasova izmerenih iza turbine (T_{41}) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.

(a) Pritisak P_{21} (S120).

(b) Relativna razlika SDN/stac (S120).

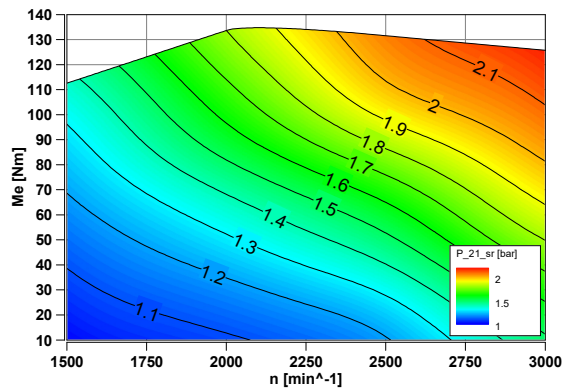
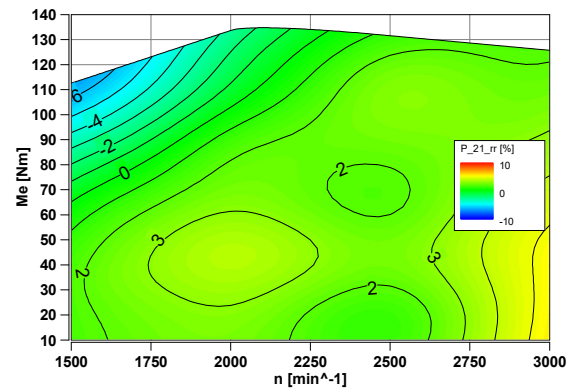
(c) Pritisak P_{21} (S420).

(d) Relativna razlika SDN/stac (S420).

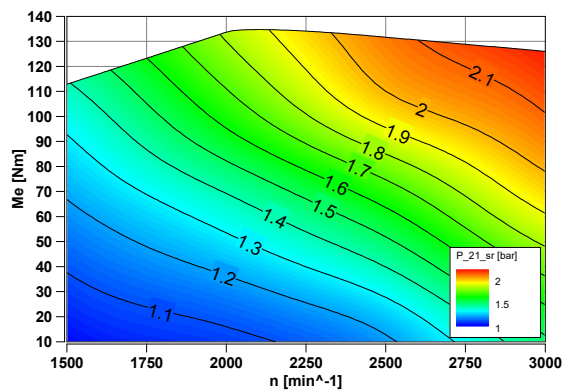
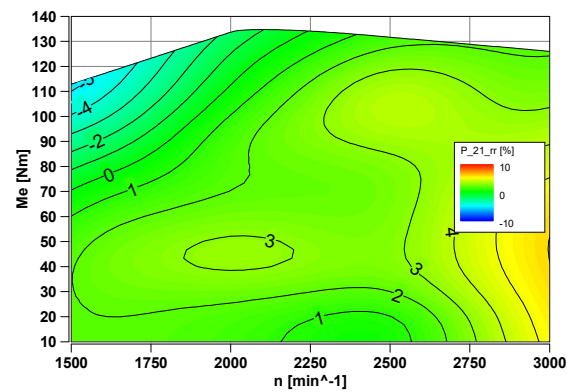
(e) Pritisak P_{21} (S600).

(f) Relativna razlika SDN/stac (S600).

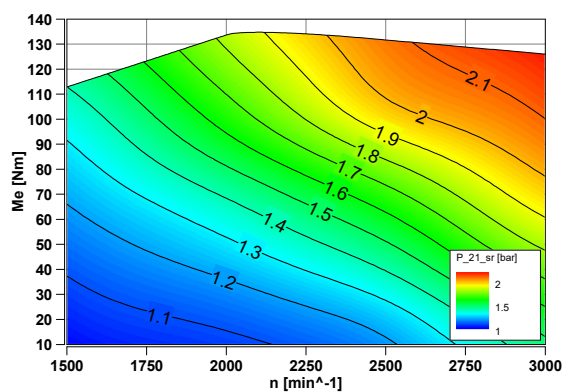
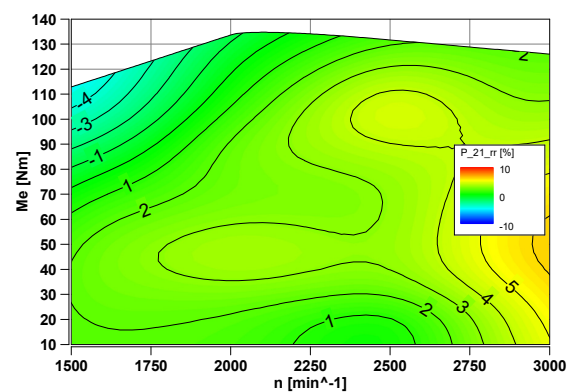
Slika 7.7.: Pritisak izmeren iza kompresora (P_{21}) pri dinamičkom ispitivanju sa stacionarnom pripremom.

(a) Pritisak P_{21} (D120).

(b) Relativna razlika SDN/stac (D120).

(c) Pritisak P_{21} (D360).

(d) Relativna razlika SDN/stac (D360).

(e) Pritisak P_{21} (D600).

(f) Relativna razlika SDN/stac (D600).

Slika 7.8.: Pritisak izmeren iza kompresora (P_{21}) pri dinamičkom ispitivanju sa dinamičkom pripremom.

7.2. Analiza rezultata stacionarne aproksimacije ispitivanja sa SDN

Za svaki od prethodnih univerzalnih dijagrama stacionarne aproksimacije ispitivanja sa SDN, određena je relativna razlika svedena na rezultate stacionarnog ispitivanja motora.

Na slikama 7.1 i 7.2 prikazani su rezultati specifične efektivne potrošnje goriva (BSFC). Iako je za određivanje BSFC potrebno analizirati više nezavisnih odziva (n , Me , GF) na dato upravljanje, rezultati stacionarne aproksimacije su veoma precizni, kao što potvrđuju dijagrami relativnih razlika. Za testove sa SDN i stacionarnom pripremom, odstupanja se kreću u granicama od -6% do $+2\%$. Najveća odstupanja se odnose na najbrži dinamički test (S120), što je i očekivano, ali čak i kod ovako brzog testa veći deo rezultata je dosta precizan zahvaljujući brzom procesu i brzom odzivu korišćenih mernih lanaca. Eksperimenti sa dinamičkom pripremom sistema pokazuju nepovoljnije rezultate (D120), dok sporije sekvence (D360 i D600) pokazuju najbolje poklapanje sa stacionarnim podacima.

Temperatura izduvnih gasova motora igra važnu ulogu pri projektovanju upravljanja motorom. Kao što je napomenuto, merenje temperature izduvnih gasova karakteriše značajna termička inercija, stoga je očekivano određeno odstupanje stacionarne aproksimacije eksperimenta sa SDN u poređenju sa rezultatima kvazistacionarnih ispitivanja. Na slikama 7.3 i 7.4 prikazani su univerzalni dijagrami temperature izduvnih gasova T_{31} , merene na ulaznom preseku turbine. Za test sa stacionarnom pripremom se sa produženjem eksperimenta dobija tačnija aproksimacija, a maksimalna odstupanja najdužeg testa (S600) su u granicama od -10% do $+8\%$. Oblast dijagrama koju karakteriše srednje opterećenje je najpreciznija, jer se u toj oblasti nalazi stacionarni radni režim sa koga započinje sekvenca sa SDN. Dijagrami rezultata testa sa dinamičkom pripremom za parametar T_{31} izgledaju nešto drugačije. Maksimalna odstupanja su veća (-16%), a dobro poklapanje rezultata sa podacima stacionarnih ispitivanja je u oblasti nižih opterećenja. Zaključuje se da eksperimenti sa dinamičkom pripremom sistema nisu povoljni za određivanje stacionarne aproksimacije veličina koje karakteriše spor odziv, odnosno spor odziv i istovremeno relativno velika amplituda.

Parametri stanja izduvnog gasa na izlaznom preseku turbine (T_{41}) određuju količinu toplote koja se predaje sistemu za naknadni tretman izduvnih gasova, kao što su katalizatori i sistem za selektivnu katalitičku redukciju (eng.: *SCR - Selec-*

tive Catalytic Reduction), a za njihovo efikasno funkcionisanje je neophodan visok termički nivo. Razvoj strategije brzog uzgrevanja ovih sistema je izuzetno važno za ukupno smanjenje toksičnih komponenti u izduvnom gasu prilikom eksploatacije motora, jer upotreba motora uglavnom započinje podhlađenim termičkim stanjem. Identična načela važe i prilikom sprovođenja odgovarajućih homologacionih ispitivanja što potvrđuju istraživanja na tu temu [154, 22].

Na slikama 7.5 i 7.6 prikazane su stacionarne aproksimacije temperature T_{41} . S obzirom na to da se očekuju apsolutno niže vrednosti temperature u poređenju za presekom izduvnog kolektora ispred turbine, primećuju se određena odsupanja posebno pri nižim opterećenjima (čak do +50% za S120). Sa smanjenjem gradijenta rampe dobija se aproksimacija koja više odgovara stacionarnom režimu, veoma slični rezultati se dobijaju za stacionarnu i dinamičku pripremu sistema. Za testove sa SDN najdužeg trajanja (S600 i D600) krajnji rezultati se nalaze u granicama od -5% do +30% u odnosu na podatke dobijene stacionarnim ispitivanjem.

Pritisak u usisnom kolektoru motora P_{21} izabran je kao primer merene veličine brzog odziva i dovoljno velike promene u funkciji nezavisnih upravljačkih veličina. Na slikama 7.7 i 7.8 su prikazane stacionarne aproksimacije ovog parametra za eksperimente sa stacionarnom i dinamičkom pripremom sistema. Primećuju se veća odstupanja na dijagramima relativne razlike za testove sa SDN započete stacionarnim režimom (od -8% do -1%) u poređenju sa D120, D360 i D600 kod kojih je najzastupljenije odstupanje oko 2%. Ne treba zaboraviti da brojna vrednost u oznaci testa sa SDN označava vreme nagibne promene upravljačkog parametra tokom ispitivanja na jednom brzinskom režimu.

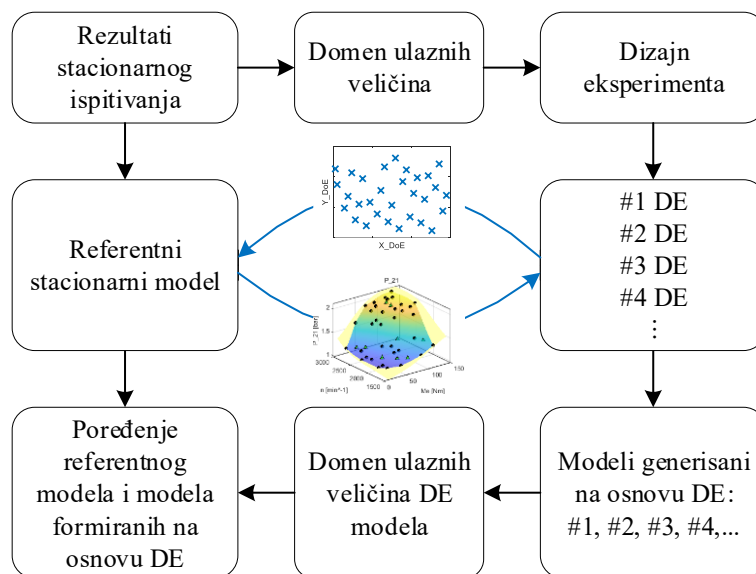
8. Povećanje efikasnosti stacionarnog ispitivanja motora SUS

U prethodnim poglavljima opisana je procedura dinamičkog ispitivanja motora promenom upravljačkog parametra po nagibnoj funkciji niskog gradijenta, prikazani su karakteristični rezultati i prokomentarisano je odstupanje istih od rezultata stacionarnog ispitivanja. U nastavku će biti analizirane mogućnosti upotrebe rezultata testa sa SDN radi sticanja dodatnog znanja (predznanja) o ispitivanom objektu, a pre formiranja plana stacionarnog ispitivanja. S obzirom na dostupnost rezultata stacionarnih ispitivanja, prvo će biti prikazana analiza zavisnosti kvaliteta stacionarne aproksimacije u funkciji broja radnih režima i njihovog pozicioniranja unutar globalnog radnog prostora, a potom će predstavljeni koncept biti prenet na podatke dobijene ispitivanjem sa SDN. Takođe, biće prikazan značaj analize promene (prvog i drugog izvoda) merene veličine kako bi se identifikovale oblasti unutar radnog polja motora na kojima je poželjno povećati broj tačaka, odnosno sprovesti dodatna stacionarna ispitivanja sa ciljem formiranja što kvalitetnije aproksimacije i preciznijeg univerzalnog dijagrama merene veličine.

Iako je motor stacionarno ispitivan na širem radnom području, prikazanom na slici 6.8, sve analize se odnose na nešto užu opseg upravljačkih veličina koji odgovara oblastima ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema (poglavlje 6.2) kako bi rezultati mogli jednostavnije da se uporede. Ovaj opseg je takođe iskorišćen prilikom prikaza rezultata testa sa SDN (poglavlje 7).

Na slici 8.1 prikazana je funkcionalna šema analize stacionarnih modela merenih motorskih veličina. Na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja motora formirani su referentni modeli (u daljem tekstu označeno sa REF), a domen, tj. granice upravljačkih parametara ovih modela iskorišćeni su kao jedino predznanje o ispitivanom

objektu prilikom kreiranja potencijalnog plana eksperimenta. Na ovaj način, referentni modeli će poslužiti kao osnova za generisanje novih setova podataka na radnim tačkama koje su definisane primenom algoritma za DE. O matematičkim modelima i načinu odabira modela koji ima najprihvatljivije statističke parametre će biti više reči u odeljku 8.1.



Slika 8.1.: Funkcionalna šema analize rezultata kvazistacionarnih ispitivanja sa aspekta redukovano broja radnih režima generisanih posredstvom DE algoritma.

Podaci dobijeni evaluacijom referentnih modela, koriste se za generisanje novih aproksimativnih modela izlaznih veličina, nakon čega je moguće izvršiti poređenje referentnih modela i modela koji su formirani nad novim setom radnih režima. U konkretnom slučaju, referentni modeli su formirani na osnovu 132 stacionarno ispitana radna režima raspoređena pretežno po linijama karakteristika opterećenja. Ovakav raspored tačaka je povoljan sa aspekta formiranja aproksimacije merenih motorskih veličina na konkretnim karakteristikama opterećenja, ali nije najpovoljniji izbor za formiranje aproksimativnih modela koji su funkcija dve nezavisne promenljive. Povećana zastupljenost podataka u jednom pravcu izaziva pojavu loše generalizacije u ortogonalnom pravcu, odnosno očekivana je pojava jurenja podataka (overfita). Da bi se kvantifikovao pravac prostiranja podataka potrebno je izvršiti kombinovanu analizu:

- Određivanja pravaca elipse verovatnoće (eng.: *Covariance Error Ellipse*), tj. glavne i pomoćne ose elipsoidne izokonture koja omogućava vizuelizaciju 2D Gausove raspodele za dati interval verovatnoće;

- Određivanje ukupnog unakrsnog rastojanja između svih tačaka date populacije u pravcu glavne i pomoćne ose elipse verovatnoće.

Ukoliko se odredi kovarijansa matrice posmatrane populacije N tačaka definisane pomoću vektora x i y koordinata tačaka, tako da je:

$$\text{cov}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{X}_i - \mu_X)(\mathbf{Y}_i - \mu_Y) \quad (8.1)$$

gde je, μ_X srednja vrednost vektora \mathbf{X} koordinata, μ_Y srednja vrednost vektora \mathbf{Y} koordinata, moguće je odrediti sopstvene vrednosti i sopstvenu matricu kovarijanse. Ako za linearnu transformaciju, predstavljenu matricom $\mathbf{A} = \text{cov}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$, postoji vektor $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^n \neq 0$ takav da za skalar λ važi relacija:

$$\mathbf{A}\mathbf{E} = \lambda\mathbf{E} \quad (8.2)$$

onda skalar λ predstavlja sopstvenu vrednost matrice \mathbf{A} sa odgovarajućim (desnim) vektorom sopstvenih vrednosti \mathbf{E} .

Pravac glavne ose elipse verovatnoće posmatranih tačaka određuje se kao inverzni tangens (za sva četiri kvadranta), uzimajući kao argumente koordinate sopstvenog vektora koje odgovaraju maksimalnim sopstvenim vrednostima:

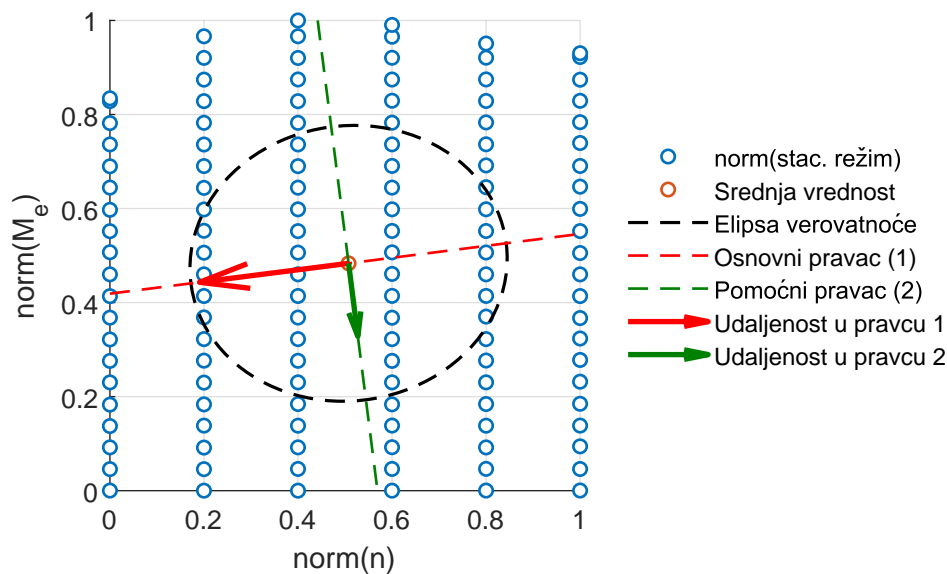
$$\alpha = \text{atan}(\mathbf{E}(\max(\lambda))) \quad (8.3)$$

Za određivanje i iscrtavanje elipse verovatnoće, neophodno je rešiti opštu jednačinu elipse oblika:

$$\left(\frac{x_e}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y_e}{\sigma_y}\right)^2 = s \quad (8.4)$$

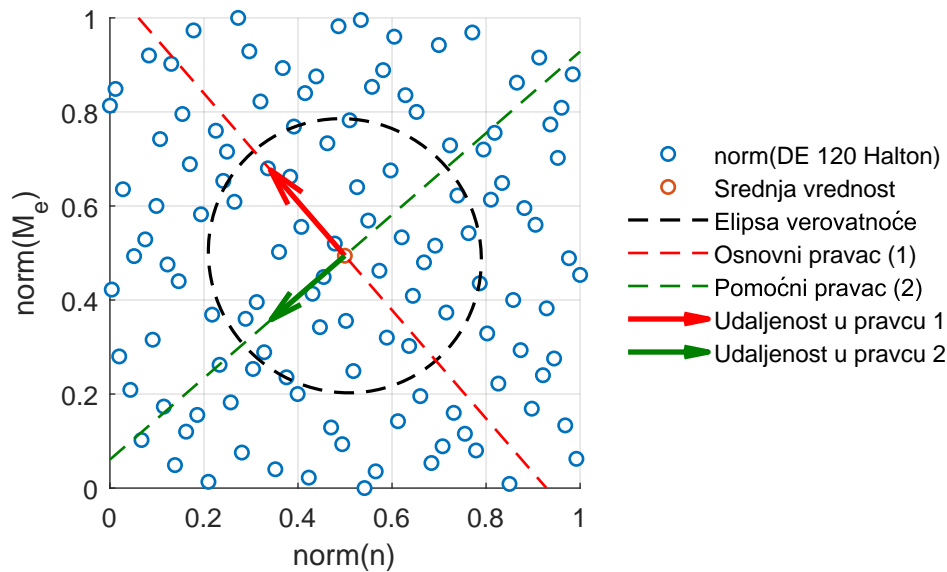
gde su x_e i y_e koordinate tačaka elipse, a σ_x i σ_y standardna odstupanja koja definišu verovatnoću prisustva posmatrane tačke izražene kroz dužinu osnovne i pomoćne ose elipse. Ukoliko raspodela vrednosti x i y koordinata tačaka posmatrane populacije odgovara Gausovoj raspodeli, leva strana jednačine 8.4 predstavlja zbir kvadrata nezavisnih normalnih raspodela i tada može da se primeni takozvana X^2 -raspodela [155] kod koje figuriše parametar „stepen slobode” u smislu određivanja kombinovane verovatnoće i određivanja preostale nepoznate veličine s .

U konkretnom slučaju, populacija tačaka, tj. x i y koordinate ne podležu normalnoj raspodeli, tako da nije moguće odrediti i iscrtati elipsu verovatnoće koja razgraničava oblast diskretnog intervala kombinovane verovatnoće (na primer 95%), ali pravac pomoćne i glavne ose elipse mogu tačno da se odrede. Kada su ovi pravci poznati, moguće je određivanje uzajamnih udaljenja svih tačaka date populacije duž osnovnog i pomoćnog pravca. Na slici 8.2 prikazane su normalizovane pozicije radnih režima na kojima je izvršeno stacionarno ispitivanje motora, elipsa proizvoljnog intervala verovatnoće i vektori čiji intenziteti kvantifikuju dominantne udaljenosti između tačaka posmatrane populacije.



Slika 8.2.: Pravac prostiranja radnih režima stacionarnog ispitivanja motora.

Primećuje se da je udaljenje između pojedinih radnih režima veće u pravcu glavne ose elipse verovatnoće (pravac 1), za razliku od pravca pomoćne ose. Odstupanje pravaca osa elipse od vertikalnog i horizontalnog pravca uslovljeno je neravnomernom zastupljenošću tačaka unutar faktorijskih granica radnog prostora (nedostaju tačke pri višim vrednostima normalizovanog M_e). Jasno je da je dominantan pravac prostiranja radnih režima duž karakteristike opterećenja, za razliku od niza radnih režima prikazanih na slici 8.3, generisanih posredstvom Holtonove sekvence za identične granične uslove. Primećuje se da je elipsa proizvoljne verovatnoće prisustva tačke približno kružnog oblika i da su intenziteti vektora koji karakterišu pravac prostiranja tačaka u dva ortogonalna pravca skoro identični. Na dijagramu je prikazan rezultat Haltonove sekvence za 120 tačaka, ali veoma slični rezultati se dobijaju i za manje vrednosti željenog broja tačaka datog dizajna eksperimenta.



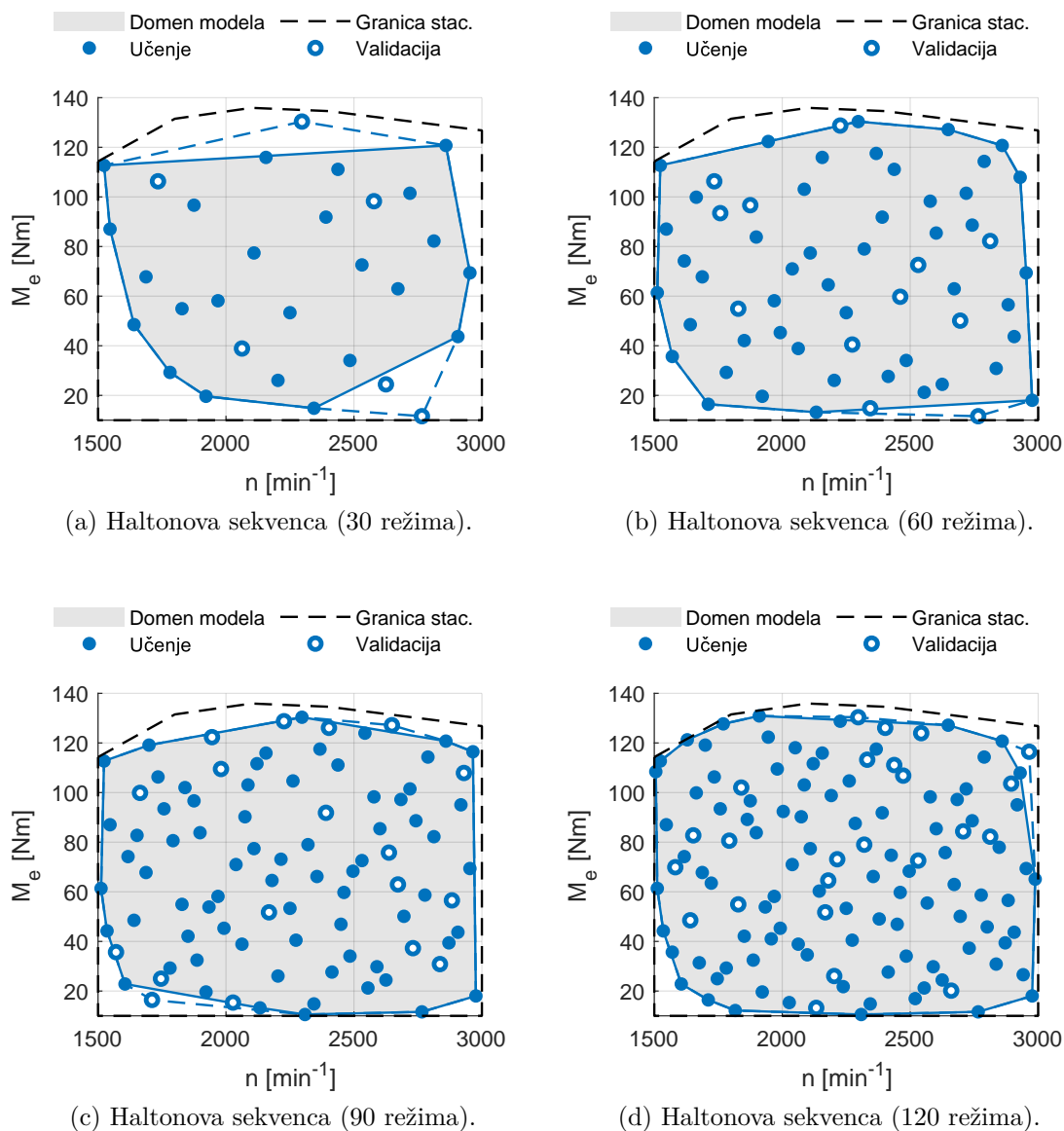
Slika 8.3.: Pravac prostiranja radnih režima generisanih algoritmom DE - Haltonova sekvenca od 120 radnih režima.

Osnovna ideja Haltonove sekvence je prikazana u poglavlju 4.1.4, a pri ovoj analizi je upotrebljena zbog svojih sledećih karakteristika:

- Vrednosti tačaka Haltonove sekvence su samo funkcija trenutnog broja tačaka, početnih opsega ulaznih veličina i odabranih vrednosti osnove b za svaku nezavisnu ulaznu veličinu (predefinisani koeficijenti). Drugim rečima, ne postoji kvazinasumična zavisnost pozicije tačaka prilikom višestrukog (sukcesivnog) pozivanja DE algoritma, kao što je to slučaj pri višestrukom formiranju Sobolovih sekvenci;
- Halton sekvence manjeg broja tačaka karakteriše veća vrednost minimalnog udaljenja između tačaka dizajna nego što je to slučaj kod Sobolove sekvence, odnosno uniformnija je raspodela tačaka unutar radnog polja što je pozitivno sa aspekta formiranja matematičkih modela;
- Pri generisanju više Haltonovih sekvenci sa različitim brojem tačaka, setovi podataka manjeg obima biće sadržani unutar sekvenci sa većim broja tačaka. Drugim rečima, nove tačke eksperimenta se dodaju na već postojeći dizajn, za razliku od Sobolove sekvence kod koje svako pokretanje algoritma formira potpuno nov niz tačaka.

Za poređenje rezultata aproksimacije različitih motorskih parametara u funkciji broja tačaka dizajna eksperimenta formirani su planovi ispitivanja od 30, 60, 90 i 120

tačaka primenom Haltonove sekvence. Pozicije radnih režima i nasumično izabranih tačaka za validaciju modela su prikazane na slici 8.4. Pored navedenog, grafikoni prikazuju granice upravljačkih parametara pri stacionarnom ispitivanju, domen koji bi model obuhvatao ukoliko bi se sve tačke iskoristile za modeliranje (bez validacije) i konačne oblasti za koje važe formirani modeli bez zalaženja u oblast ekstrapolacije.



Slika 8.4.: Pozicije radnih režima generisani Haltonovom sekvencom i oblast validnosti modela za različiti broj radnih režima.

8.1. Poređenje osnovnih stacionarnih modela

Aproksimativni modeli formirani su u okviru *Matlab* alata za modelski zasnovanu kalibraciju. Iskorišćen je metod jednostepenog plana ispitivanja, odnosno sve upravljačke veličine se koriste kao promenljive za definisanje globalnog radnog prostora motora kojima odgovara jedna izlazna veličina (MISO sistem). Za aproksimaciju svakog od rezultata stacionarnih ispitivanja formirana je serija matematičkih modela koji se dele na:

- Funkcije radijalne osnove (FRO);
- Hibridne funkcije radijalne osnove (hibridne FRO) i
- Funkcije Gausovog procesa (GP).

Za hibridne funkcije radijalne osnove, linearni deo aproksimacije je ograničen na polinomski model prvog reda oblika:

$$y_{lin}(u_1, u_2) = c_1 + c_2u_1 + c_3u_2 \quad (8.5)$$

tako da su tri parametra modela rezervisani za ovu polinomsku aproksimaciju, za razliku od običnih funkcija radijalne osnove koje ne sadrže prethodnu polinomsku aproksimaciju.

Pored različitih osnovnih funkcija (*multiquadric*, *recmultiquadric*, *gaussian*, *thinplate*, *logisticrbf*, *wendland*, *linearrbf* i *cubicrbf*), za FRO i hibridne FRO kategorije modela, definisani su maksimalno dozvoljeni brojevi čvorova koje model može da poseduje prilikom dostizanja prethodno definisane minimalne promene parametara modela u iterativnom procesu, odnosno prilikom dostizanja konvergentnog oblika. Funkcije Gausovog procesa su formirane za različite oblike osnovnih funkcija (eksponencijalna, kvadratna eksponencijalna, Maternova tropolovinska i petopolovinska, racionalna kvadratna i sve podvarijante nabrojanih osnovnih funkcija na osnovu AORP). Za formiranje matematičkih modela korišćena je računarska konfiguracija opisana u tabeli A.10. Uz omogućeno paralelno procesiranje, u relativno kratkom roku se formiraju sve varijante modela (ukupno 150) koji važe pri analizi jedne posmatranje izlazne veličine (na primer T_{31}). Analizom statističkih parametara, kao što su broj parametara modela, srednje kvadratno odstupanje, vrednost *PRESS* parametra, srednje kvadratno odstupanje podataka za validaciju, vrednost Akaikeovog (Hirotugu Akaike) informacionog kriterijuma (*AICc*) [156]

itd., uz obaveznu analizu grafičke interpretacije formiranih aproksimacija, odabrani su modeli koji sa zadovoljavajućom tačnošću opisuju datu promenu uz minimalnu kompleksnost modela i dobru generalizaciju. Takvi modeli su proglašeni za, pretodno pominjane, referentne modele.

Evaluacijom referentnog modela na tačkama definisanim metodom DE (slika 8.4) dobijaju se interpolacioni podaci na osnovu kojih se formiraju nove serije matematičkih modela, a potom se odabira najbolja aproksimacija i vrši uzajamno poređenje. S obzirom na to da je prilikom ispitivanja motora meren znatan broj raznorodnih fizičkih veličina, za dalju analizu i prikaz rezultata biće razmatrana merenja pritiska u usisnom kolektoru motora, jer je odziv ovog mernog lanca relativno brz, i temperatura na nekoliko preseka usisnog i izduvnog sistema, kao predstavnika inertnijih merenja.

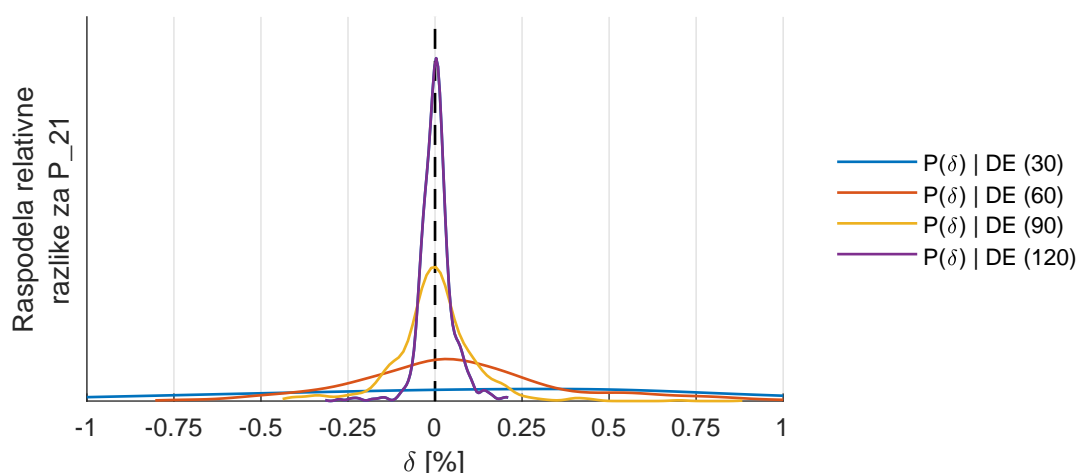
U tabeli 8.1 su prikazane osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih na osnovu plana ispitivanja redukovano broja tačaka za vrednosti pritiska u usisnom kolektoru motora P_{21} . Uočava se da se sa povećanjem broja tačaka povećava kompleksnost odabranih modela kao i da opadaju vrednosti parametra AICc. Ovaj parametar je pokazatelj relativnog kvaliteta statističkog modela formiranog nad dostupnim setom podataka.

Opis modela	Broj tačaka (trening+val.)	Tip modela	Tip funkcije jezgra	Param./ Max. c. ¹	Std. dev. PRESS	Std. dev.	AICc
Ref. stac.	132 (106+26)	Hibridna FRO	Vendland (C2)	35/32	4.155e-3	3.189e-3	-1154
#1 DE	30 (24+6)	Hibridna FRO	Multikvadratna	14/25	8.952e-3	4.114e-3	-284
#2 DE	60 (48+12)	Hibridna FRO	Vendland (C2)	31/43	2.259e-3	1.509e-3	-684
#3 DE	90 (72+18)	Hibridna FRO	Multikvadratna	50/47	1.150e-3	5.117e-4	-1201
#4 DE	120 (96+24)	Hibridna FRO	Multikvadratna	66/88	4.323e-4	2.565e-4	-1771

Tabela 8.1.: Osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih nad redukovanim setom tačaka za parametar P_{21} .

Ako se na domenu ulaznih veličina, koji odgovara oblasti konveksnog omotača (eng.: *Convex hull*) radnih režima, isključujući tačke za validaciju, izvrši poređenje modelirane (izlazne) veličine za referentni model i modele nastale evaluacijom referentnog modela nad redukovanim brojem tačaka, moguće je formiranje histograma raspodele relativnih razlika ovih modela. Ovakav dijagram za parametar P_{21} prikazan je na slici 8.5. Očekivano, sa porastom broja tačaka na osnovu kojih se formira model, potencijal aproksimacije raste i iz tog razloga se povećava zastupljenost apsolutno niskih vrednosti relativne razlike posmatranih aproksimativnih modela.

¹Maksimalno dozvoljeni broj centara FRO



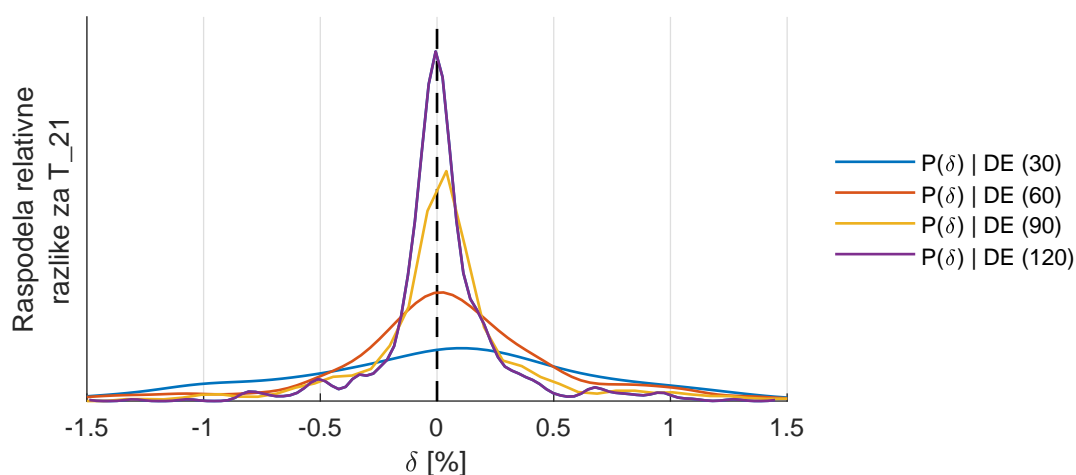
Slika 8.5.: Raspedela relativnih razlika referentnog modela i matematičkih modela formiranih nad redukovanim brojem tačaka za parametar P_{21} .

Slični dijagrami mogu da se formiranju i za ostale modelirane veličine, a zaključak je identičan. Radi poređenja, na slikama 8.6 i 8.7 prikazani su histogrami relativnih odstupanja formiranih stacionarnih modela za temperaturu usisnog vazduha na izlaznom preseku kompresora T_{21} i temperaturu izduvnihi gasova T_{31} . Tabele 8.2 i 8.3 sadrže osnovne informacije o matematičkim modelima koji su korišćeni pri formiranju navedenih dijagrama raspodele relativnog odstupanja za navedene temperature.

Opis modela	Broj tačaka (trening+val.)	Tip modela	Tip funkcije jezgra	Param./Max. c.	Std. dev. PRESS	Std. dev.	AICc
Ref. stac.	132 (106+26)	Hibridna FRO	Multikvadratna	56/78	0.18	0.1	-317
#1 DE	30 (24+6)	GP	$ARDSquaredExp^2$	22.062	0.923	0.107	-
#2 DE	60 (48+12)	GP	$ARDSquaredExp$	27.575	0.704	0.259	-
#3 DE	90 (72+18)	GP	$ARDSquaredExp$	34.586	0.511	0.219	-
#4 DE	120 (96+24)	GP	$ARDSquaredExp$	35.242	0.362	0.241	-

Tabela 8.2.: Osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih nad redukovanim setom tačaka za parametar T_{21} .

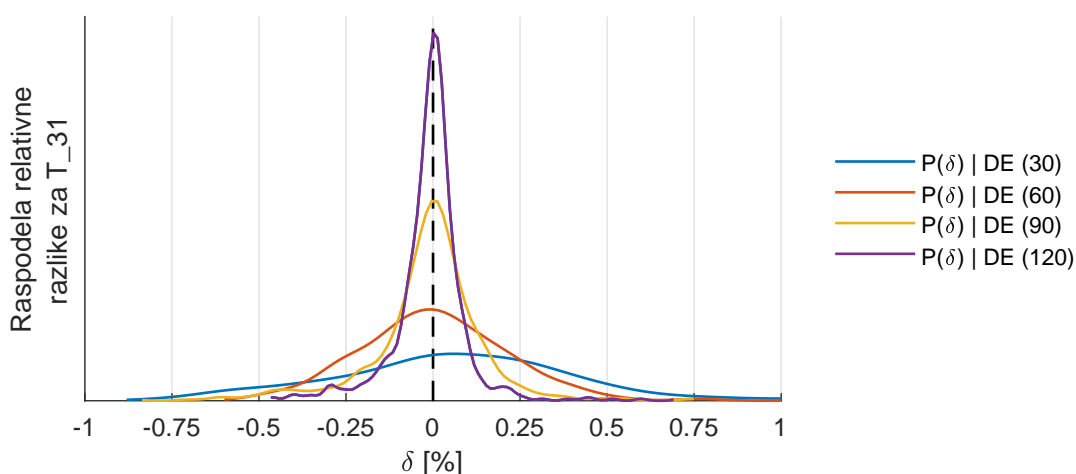
²Kvadratna eksponencijalna funkcija sa AORP



Slika 8.6.: Raspodela relativnih razlika referentnog modela i matematičkih modela formiranih nad redukovanim brojem tačaka za parametar T_{21} .

Opis modela	Broj tačaka (trening+val.)	Tip modela	Tip funkcije jezgra	Param./ Max. c.	Std. dev. PRESS	Std. dev.	AICc
Ref. stac.	132 (106+26)	Hibridna FRO	Multikvadratna	35/55	2.092	1.448	-145
#1 DE	30 (24+6)	GP	<i>ARDSquaredExp</i>	18.204	3.283	0.826	-
#2 DE	60 (48+12)	GP	<i>ARDSquaredExp</i>	23.194	1.784	0.896	-
#3 DE	90 (72+18)	GP	<i>ARDSquaredExp</i>	44.608	1.253	0.335	-
#4 DE	120 (96+24)	GP	<i>ARDSquaredExp</i>	51.287	0.901	0.325	-

Tabela 8.3.: Osnovne karakteristike i statistički parametri referentnog modela i modela formiranih nad redukovanim setom tačaka za parametar T_{31} .

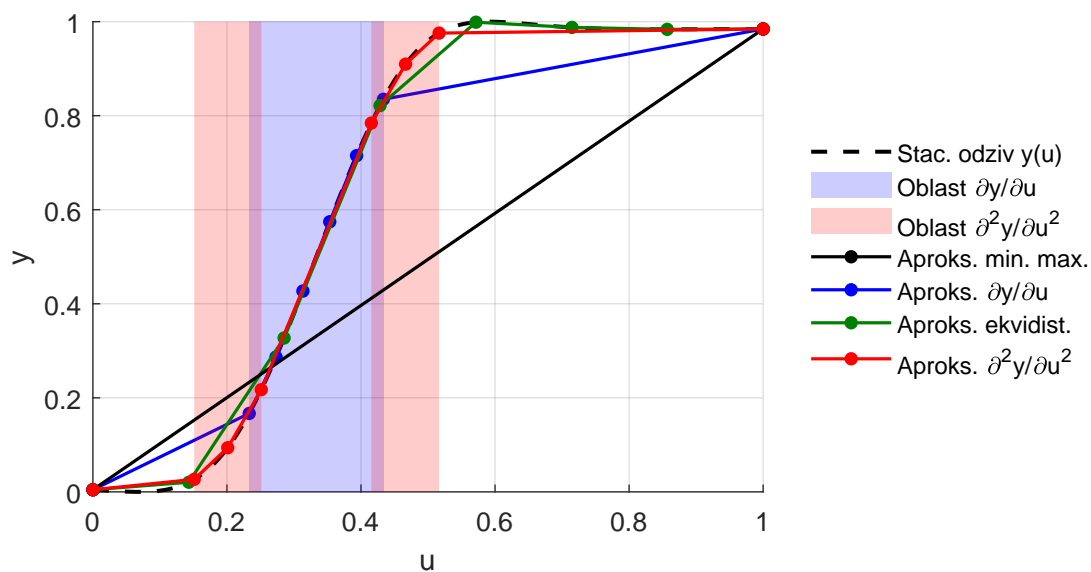


Slika 8.7.: Raspodela relativnih razlika referentnog modela i matematičkih modela formiranih nad redukovanim brojem tačaka za parametar T_{31} .

8.2. Oblasti za dodavanje tačaka

Sa povećanjem broja radnih režima na kojima bi se ispitivao motor, nedvosmisleno se stvara više mogućnosti za formiranje kompleksnijih i kvalitetnijih aproksimativnih modela. Negativni aspekti povećanja broja radnih režima su jasni, a legitimno pitanje koje sledi jeste da li postoje određene oblasti unutar radnog polja motora na kojima bi bilo poželjno sprovesti dodatno ispitivanje u cilju dobijanja matematičkog modela koji bi bolje opisao promenu parametra od interesa.

U prethodnom odeljku razmatrana je kvazi-uniformna raspodela tačaka unutar radnog polja, i kroz analizu formiranih aproksimativnih modela iscertane su raspodele relativne razlike takvih modela za pojedine merene veličine. U ovom odeljku, razmotriće se mogućnost ciljanog dodavanja tačaka u određene oblasti radnog područja motora SUS, ali pre toga, ideja će biti demonstrirana na jednodimenzionom proizvoljnom procesu stacionarne karakteristike prikazane na slici 8.8. Neka je $y(u)$ stacionarni odziv proizvoljnog procesa koji želimo da ispitamo na ograničenom broju tačaka sa ciljem formiranja odgovarajuće aproksimacije. Radi jednostavnosti, na dijagramu su prikazane aproksimacije u obliku linerne interpolacije. Pretpostavimo da o procesu nemamo nikakvo predznanje, osim opsega ulazne veličine za koji možemo pouzdano da sprovodimo analizu, $u = [0, 1]$.



Slika 8.8.: Primer stacionarnog procesa i oblici linearne aproksimacije kao funkcije pozicije tačaka na kojima je poželjno sprovesti ispitivanje.

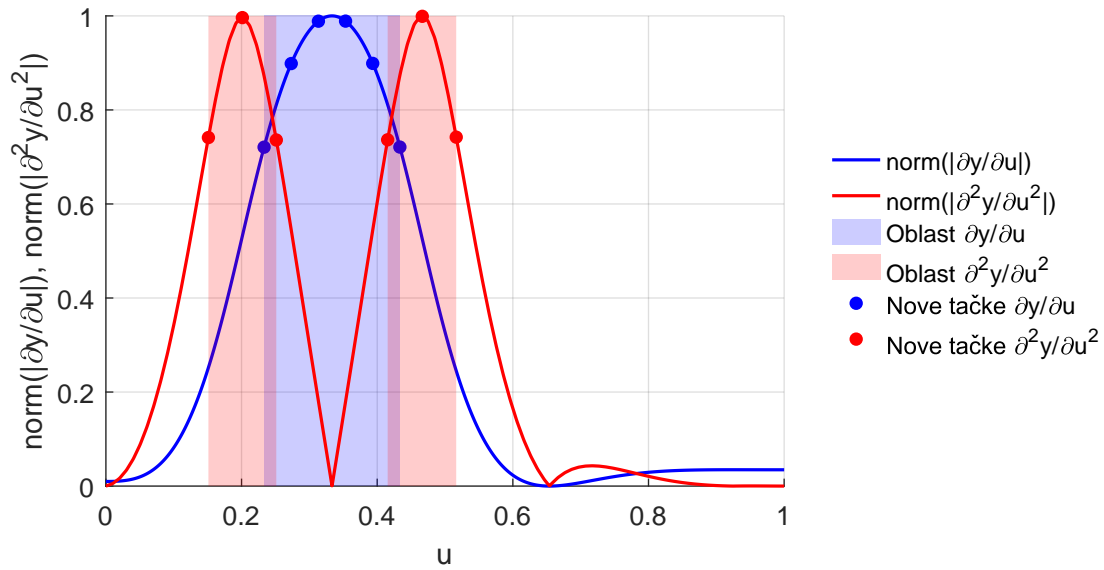
Ukoliko se postavi ograničen broj ekvidistantnih tačaka unutar ulaznog domena, dobiće se određeno odstupanje linearne aproksimacije od linije stacionarnog odziva, što je očekivano. Ako je stacionarna karakteristika takva da postoje oblasti unutar kojih je neznatna promena izlazne veličine, tačke postavljene u toj oblasti su praktično višak, jer će oblik aproksimacije ostati nepromenjen i ako se takve tačke ne uzmu u razmatranje. Ovakav zaključak upućuje da analiza promene posmatranog procesa, izražene jednačinom:

$$\nabla y(u) = \frac{\partial y}{\partial u} \vec{e}_u \quad (8.6)$$

za jednodimenzionu promenu, može da ukaže na oblasti unutar kojih je potrebno postaviti tačke za potencijalno ispitivanje. Normalizovana vrednost prvog izvoda posmatrane stacionarne karakteristike procesa prikazana je na slici 8.9 i naznačene su oblasti ulaznog domena u kojima ova promena ima najviše vrednosti. Širina oblasti je birana tako da obuhvata 20% ulaznog opsega. Ukoliko se pored graničnih vrednosti ulaznog opsega, doda niz ekvidistantnih tačaka unutar ove oblasti, i formira svojevrsna linearna aproksimacija, primećuje se da je dobijeno odstupanje od linije stacionarne karakteristike veće nego u prethodnom slučaju. Drugim rečima, ukoliko su dodate tačke unutar oblasti koje karakteriše približno konstantna promena, rezultat neće biti povoljan, što upućuje na potrebu za analizom izvoda višeg reda, odnosno drugog izvoda posmatranog procesa. Drugi izvod, u zapisu jednodimenzionog procesa, određen je jednačinom:

$$\nabla^2 y(u) = \frac{\partial^2 y}{\partial u^2} \vec{e}_u \quad (8.7)$$

Takođe, na slici 8.9 su prikazane normalizovane apsolutne vrednosti drugog izvoda i naznačene su oblasti, identične ukupne širine kao u prethodnoj analizi, u kojima su vrednosti ove promene najviše. Kako bi moglo da se izvrši korektno poređenje, unutar navedenih oblasti je dodat isti broj tačaka i na osnovu vrednosti stacionarnog odziva procesa date stacionarne karakteristike je formirana odgovarajuća linearna aproksimacija. Primećuje se da je poklapanje ovako formirane aproksimacije proizvoljnog procesa najbolje, što može da se kvantifikuje određivanjem srednjih kvadratnih odstupanja formiranih aproksimacija. U tabeli 8.4 su prikazani osnovni statistički parametri navedenih aproksimacija primera stacionarne karakteristike sa slike 8.8.



Slika 8.9.: Normalizovane apsolutne vrednosti prvog i drugog izvoda proizvoljnog procesa i oblasti za dodavanje tačaka.

Dodavanje tačaka	Ukupan broj tačaka	Varijansa (s^2)	Standardna devijacija (s)
Ekvidistantno (min. i max.)	2	0.0663	0.2574
U oblasti visoke vrednosti ∇y	8	0.0044	0.0660
Ekvidistantno	8	4.2191e-04	0.0205
U oblasti visoke vrednosti $\nabla^2 y$	8	9.2522e-05	0.0096

Tabela 8.4.: Osnovne karakteristike i statistički parametri aproksimacija stacionarnog odziva sistema sa slike 8.8.

Prethodna analiza je sprovedena na primeru aproksimacije u jednodimenzionom prostoru, ali slični zaključci mogu da se izvedu ukoliko se analizira matematički model, odnosno aproksimacija nekog od motorskih parametra snimljenih na stacionarnim režimima. Iako su referentni modeli formirani na osnovu kategorija funkcija tipa FRO, hibridne FRO i GP, za ovu priliku je formiran dodatni set aproksimacija u obliku modela *Lolimot* [157, 158]. Razlog za ubacivanje nove kategorije modela nema za cilj određivanje kvalitetnije aproksimacije, već ovi modeli otvaraju mogućnost za jednostavnu interpretaciju podmodela u smislu poznavanja njihovih granica i centara unutar globalnog radnog polja motora.

Ukoliko se za aproksimiranu izlaznu veličinu u domenu dve nezavisne ulazne veličine, odredi vrednost prvog gradijenta kao:

$$\nabla y(u_1, u_2) = \frac{\partial y}{\partial u_1} \vec{e}_{u_1} + \frac{\partial y}{\partial u_2} \vec{e}_{u_2} \quad (8.8)$$

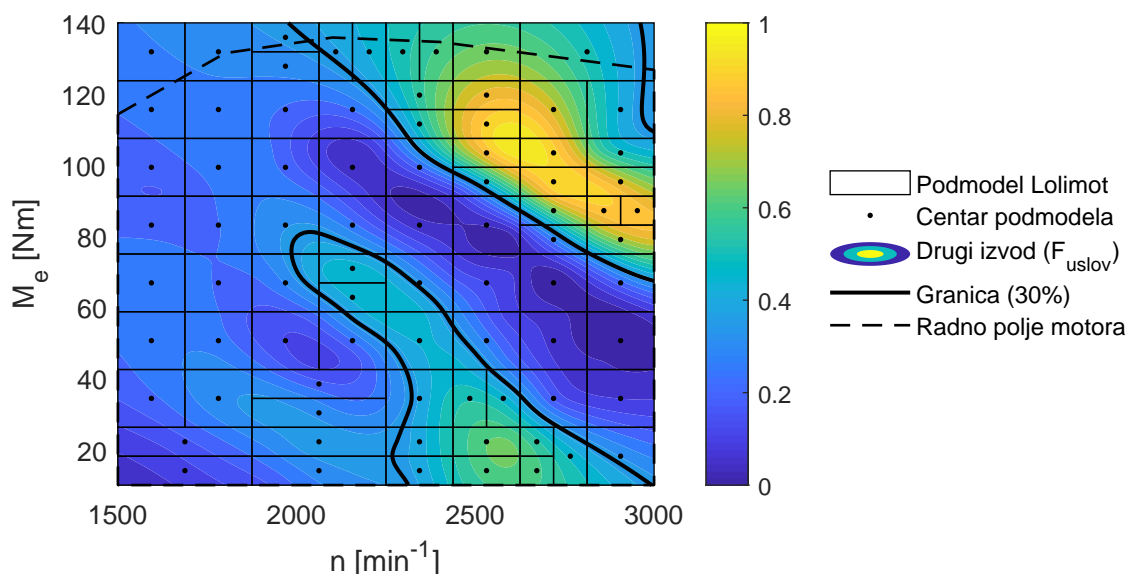
određivanjem Euklidove distance, dobija se argument za određivanje drugog gradijenta:

$$\nabla^2 y(u_1, u_2) = \nabla \|\nabla y(u_1, u_2)\| = \frac{\partial^2 y}{\partial u_1^2} \vec{e}_{u_1} + \frac{\partial^2 y}{\partial u_2^2} \vec{e}_{u_2} \quad (8.9)$$

Određivanjem ukupnog intenziteta vrednosti drugog izvoda posmatrane funkcije, pronalaženjem apsolutne vrednosti i normalizacijom, dobija se takozvana *funkcija uslova* koja kvantifikuje oblasti za dodavanje tačaka na čitavom domenu nezavisnih ulaznih promenljivih u_1 i u_2 oblika:

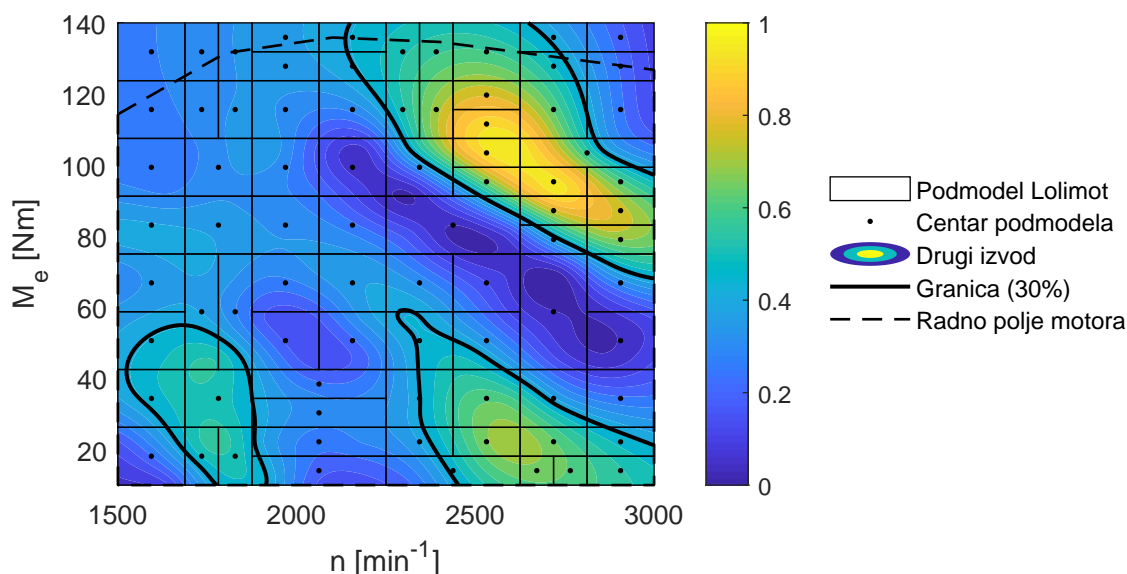
$$F_{uslov}(u_1, u_2) = norm\left(\left\|\nabla^2 y(u_1, u_2)\right\|\right) \quad (8.10)$$

Na slici 8.10 prikazane su vrednosti funkcije uslova za dodavanje tačaka na osnovu analize toka pritiska u usisnom kolektoru (P_{21}). Paralelno sa ovim prikazom, date su pozicije granica i centara podmodela globalnog modela *Lolimot*. U konkretnom slučaju, formiran je relativno kompleksan model *Lolimot* sa 80 podmodela, jer se time omogućava preciznije poređenje navedenih veličina. Primećuje se da postoji određeno poklapanje oblasti intezivnijih vrednosti funkcije uslova (F_{uslov}) i oblasti u kojima je izvršeno višestruko parcionisanje modela *Lolimot*. U tim oblastima, linearna funkcija podmodela *Lolimot*, iako ponderisana σ -funkcijom, sa visokom vrednošću srednjeg kvadratnog odstupanja aproksimira izvorne podatke. Ako se povuče paralela sa analizom prikazanom na slici 8.8, zaključuje se da promena koju želimo da aproksimiramo, u toj oblasti, ima apsolutno višu vrednost drugog izvoda, nego funkcija koja je aproksimira. Posledica ovakvog scenarija je parcionisanje podmodela *Lolimot* što omogućava fleksibilniju aproksimaciju, tj. aproksimaciju koja će bolje ispratiti posmatranu promenu. Takođe, na slici 8.10 prikazana je izo-kontura funkcije uslova koja razgraničava radno polje motora po unapred definisanom odnosu 30% : 70%. Možda treba napomenuti da je udeo površine radnog polja za dodavanje tačaka iskustveno određen kao kompromis između minimalne distance između tačaka dizajna, broja početnih tačaka i tačaka koje se dodaju planu ispitivanja za određenu dimenzionalnost ulaznog domena. Programske funkcije za rešavanje jednačine 8.10, date su u indeksnom zapisu i omogućavaju n -dimenzionalno određivanje funkcije uslova, što za više dimenzionalnosti globalnog radnog prostora znači definisanje hiper-prostora za dodavanje tačaka. U tom slučaju treba smanjiti udeo radnog polja unutar koga je dozvoljeno dodavanje tačaka, odnosno novih radnih režima.



Slika 8.10.: Kvantifikovanje oblasti (F_{uslov}) za dodavanje tačaka, pozicije podmodela aproksimacije *Lolimot* i granica oblasti za dodavanje tačaka određena za pritisak u usisnom koektoru motora P_{21} .

Slični zaključci mogu da se izvedu ukoliko se formiraju modeli *Lolimot* nad setom podataka koji odgovara promeni nekog drugog motorskog parametra. Na slici 8.11 su prikazane granice podmodela *Lolimot* i funkcija koja definiše oblasti unutar kojih je poželjno postaviti veći broj tačaka prilikom stacionarnog ispitivanja parametara T_{21} . Poređenjem rezultata za srodne veličine, kao što su parametri stanja usisnog vazduha, zaključuje se da su ove oblasti veoma slične i eventualnim povećanjem gustine tačaka za stacionarno ispitivanje unutar istih, možemo da očekujemo kvalitetniju aproksimaciju. Nažalost, ako se na ovakav način razmatra aproksimacija nekog drugog parametra, kao što je specifična efektivna potrošnja goriva ili pritisak u izduvnom kolektoru motora, karakteristične oblasti će imati drugačiji oblik. Drugim rečima, ne može da se formira univerzalni „recept” pomoću koga će se poboljšati kvalitet aproksimacije svih merenih motorskih veličina. Ovakva analiza može jedino da doprinese u smislu određivanja bolje aproksimacije razmatranih motorskih parametara.

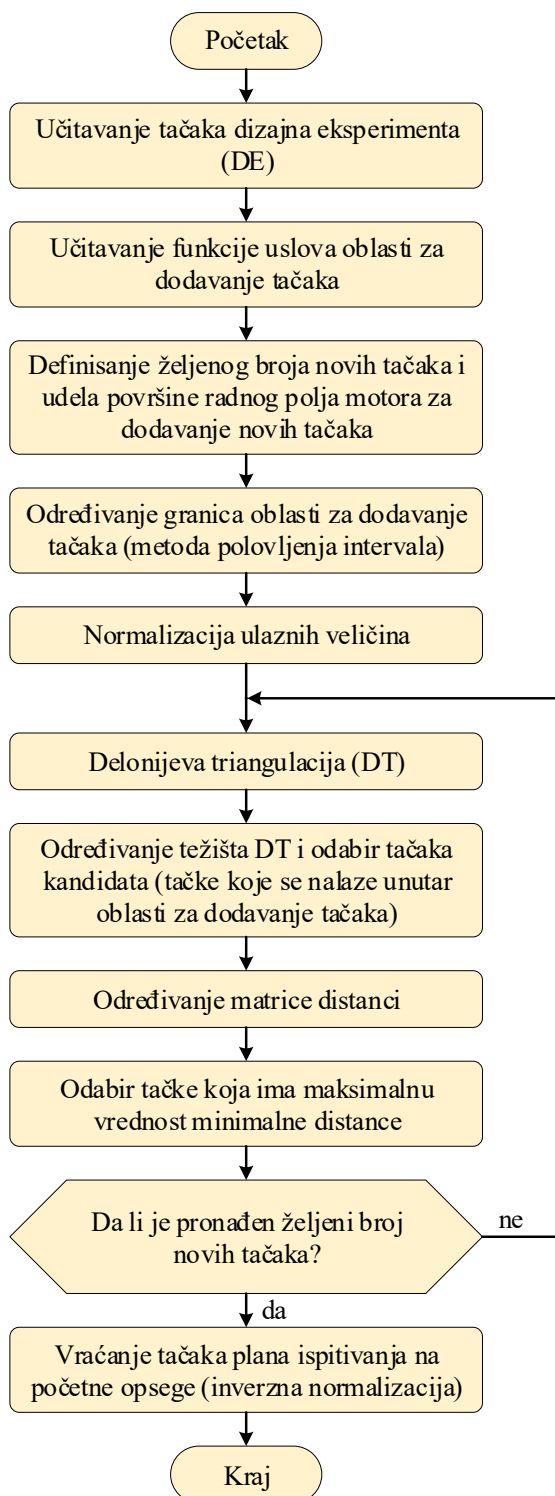


Slika 8.11.: Funkcija uslova (kvantifikovanje oblasti) za dodavanje tačaka, pozicije podmodela aproksimacije *Lolimot* i granica oblasti za dodavanje tačaka određena za temperaturu u usisnom koektoru motora T_{21} .

8.3. Algoritam za dodavanje tačaka

Nakon određivanja oblasti unutar kojih bi bilo poželjno dodati određeni broj novih tačaka, odnosno radnih režima za potencijalno stacionarno ispitivanje, kako bi konačna aproksimacija posmatrane merene veličine bila kvalitetnija i bolje opisivala fizički proces, neophodno je odrediti način za dodavanje istih. Za te potrebe razvijen je odgovarajući program čiji je osnovni algoritam prikazan na slici 8.12. Nakon učitavanja tačaka početnog dizajna eksperimenta i funkcije uslova (F_{uslov}) za dodavanje tačaka, potrebno je definisati željeni broj tačaka koji se dodaje inicijalnom dizajnu i udeo domena ulaznih parametara (npr. 30%) unutar koga je potrebno dodati tačke.

Iterativni postupak dodavanja tačaka realizovan je kroz određivanje *Delonijeve triangulacije DT* (eng.: *Delaunay Triangulation*) i pronalaženje težišta formiranih trouglova, tj. pronalaženja seta tačaka kandidata, primeni kriterijuma maksimizacije distance pri odabiru najpovoljnije tačke i proširenja prethodnog dizajna. Osnovna ideja Delonijeve triangulacije ogleda se u tome da za određenu populaciju tačaka P , triangulacija $DT(P)$ bude izvršena tako da sve preostale tačke posmatrane populacije budu van kružnice opisane oko trojke tačaka pojedinih trouglova triangulacije $DT(P)$.



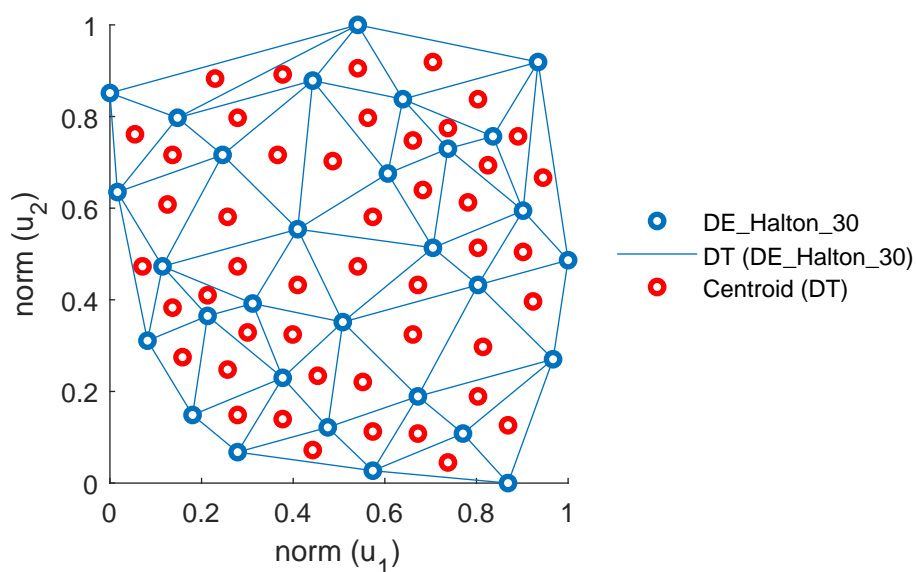
Slika 8.12.: Algoritam za dodavanje tačaka unutar radnog polja motora na osnovu postojećeg plana ispitivanja i poznate funkcije uslova (F_{uslov}) za dodavanje tačaka.

Delonijeva triangulacija nastoji da maksimizuje minimalnu vrednost unutrašnjih uglova formiranih trouglova i time poveća preklapanje površine trougla i kružnice koja ga opisuje [159]. Na taj način se teži i što manjem preklapanju kružnica opisanih oko temena susednih trouglova, što u idealnom slučaju odgovara populaciji tačaka čijom se triangulacijom dobijaju identični jednakostranični trouglovi. Algoritam određivanja Delonijeve triangulacije u dvodimenzionalnom prostoru se zasniva na rešavanju determinante:

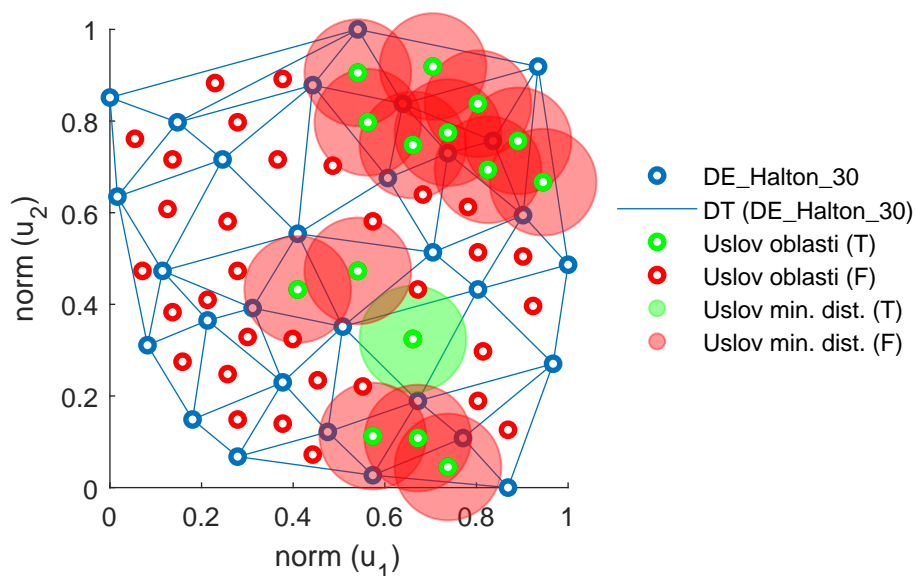
$$\begin{vmatrix} A_x & A_y & A_x^2 + A_y^2 & 1 \\ B_x & B_y & B_x^2 + B_y^2 & 1 \\ C_x & C_y & C_x^2 + C_y^2 & 1 \\ D_x & D_y & D_x^2 + D_y^2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_x - D_x & A_y - D_y & (A_x - D_x)^2 + (A_y - D_y)^2 \\ B_x - D_x & B_y - D_y & (B_x - D_x)^2 + (B_y - D_y)^2 \\ C_x - D_x & C_y - D_y & (C_x - D_x)^2 + (C_y - D_y)^2 \end{vmatrix} < 0 \quad (8.11)$$

za nekolinearne tačke A , B , C i D posmatrane populacije za koje je potrebno odrediti parove trouglova $\triangle ABC$ i $\triangle ACD$ ili $\triangle ABD$ i $\triangle BCD$. Ukoliko se koordinate x i y tačaka A , B i C uvrštavaju u pozitivnom matematičkom smeru, determinanta 8.11 je negativna samo ako se tačka D nalazi van kružnice koja opisuje trougao $\triangle ABC$. U tom slučaju podela prostora opisanog tačkama A , B , C i D na dva trougla $\triangle ABC$ i $\triangle ACD$ predstavlja ispravan način sprovođenja Delonijeve triangulacije. Ovakav način parcionisanja prostora je moguće izvršiti i u vešedimenzionom prostoru unutar koga se trouglovi zamenjuju hiper-poligonima, a kružnice koje ih opisuju, hiper-sferama [160].

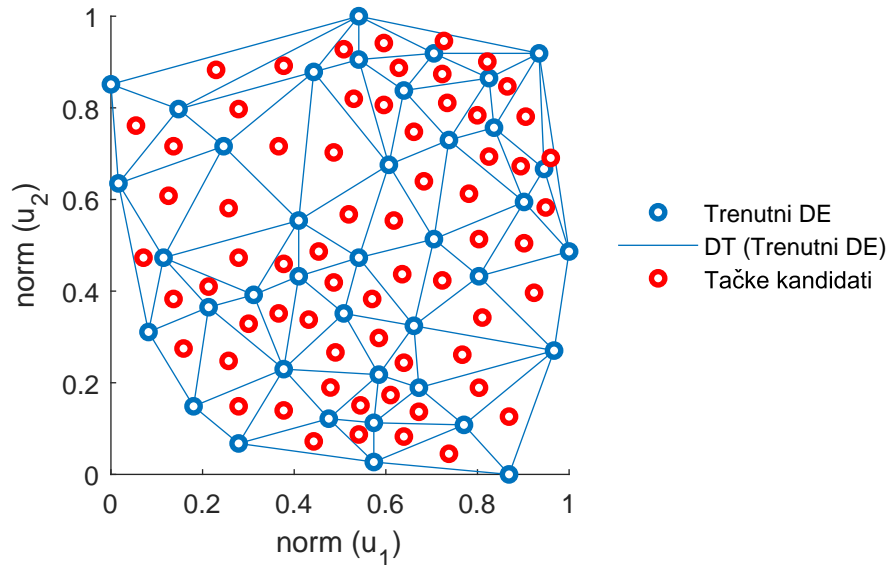
Na slici 8.13 je prikazana inicijalna triangulacija DT populacije tačaka plana ispitivanja sačinjenog od 30 tačaka Holtonove sekvence (slika 8.4a) i pozicije težišta trouglova, odnosno tačaka kandidata. Kriterijum za dodavanje tačaka predstavlja kompromis između zahteva za što većom vrednošću funkcije uslova za dodavanje tačaka i vrednosti minimalne distance između tačaka proširenog plana ispitivanja. Na slici 8.14 prikazane su tačke kandidati koje se nalaze unutar oblasti za dodavanje tačaka i skicirana je maksimalna vrednost minimalne udaljenosti između tačaka dizajna. U konkretnom slučaju, algoritam je podešen tako da prednost pri odabiru tačke bude dodeljena onoj tački koja poseduje najveće minimalno udaljenje od ostalih tačaka. Na ovaj način se u iterativnom procesu dodaje po jedna tačka sve dok se ne zadovolji uslov o željenom broju tačaka koje je potrebno dodati inicijalnom planu ispitivanja. Na slici 8.15 je prikazana triangulacija radnog polja i tačke kandidati nakon 9. iteracije procesa dodavanja tačaka. Ovim primerima odgovara funkcija uslova i granica oblasti za dodavanje tačaka koje su dobijene analizom promene stacionarnog odziva parametra $P_{_21}$ i koje su date na slici 8.10.



Slika 8.13.: Delonijeva triangulacija prostora globalnih upravljačkih veličina opisanog inicijalnim tačkama plana ispitivanja i pozicije težišta dobijenih troglova (tačke kandidati).

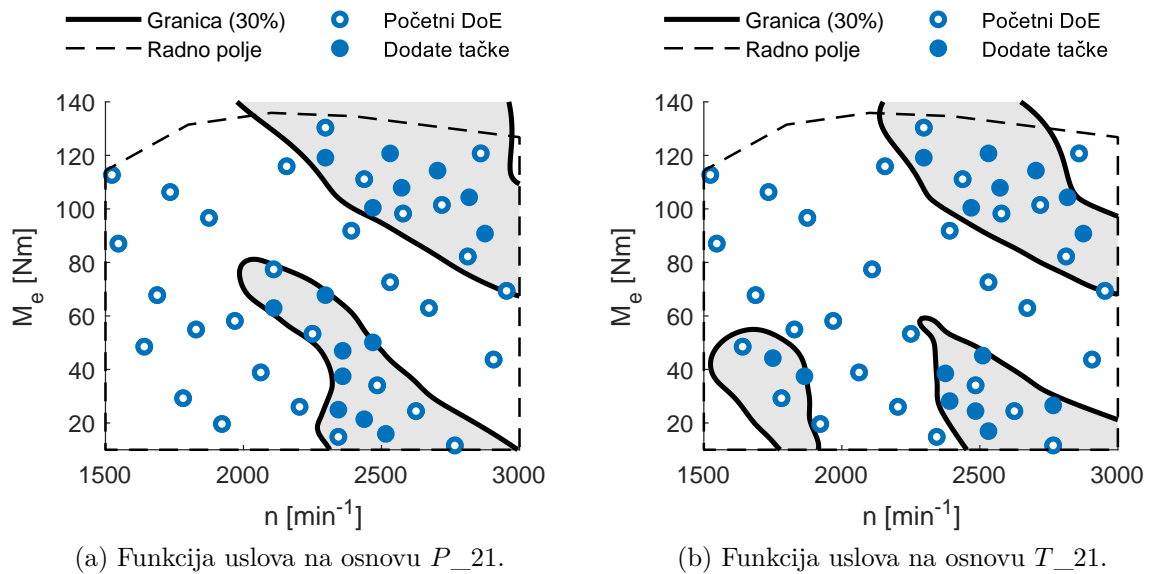


Slika 8.14.: Pozicije tačaka kandidata koje se nalaze unutar oblasti za dodavanje tačaka i ilustracija ispunjenosti uslova maksimizacije minimalnog međusobnog udaljenja između tačaka dizajna.



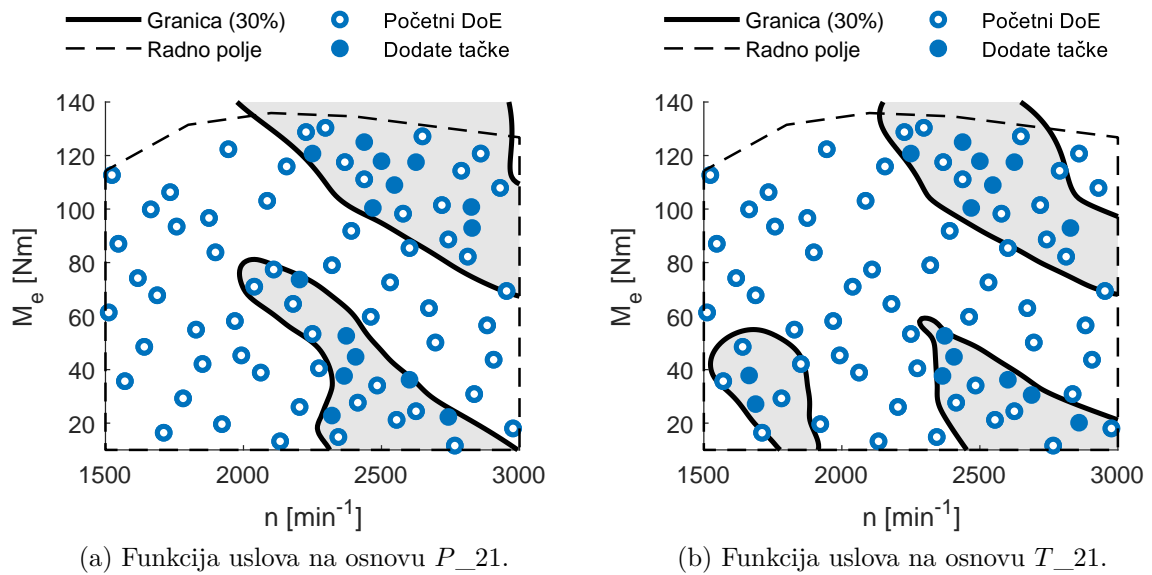
Slika 8.15.: Pozicije radnih režima u normalizovanom radnom polju nakon nekoliko iteracija dodavanja tačaka, Delonijeva triangulacija i set tačaka kandidata za narednu iteraciju.

Na slikama 8.16, 8.17 i 8.18 su prikazani konačni rezultati procesa dodavanja tačaka inicijalnom Halton dizajnu od 30, 60 i 90 tačaka. Svaki od navedenih planova ispitivanja, nadograđen je sa po 15 tačaka u oblastima koje odgovaraju najvećoj vrednosti funkcije uslova F_{uslov} formirane na osnovu analize stacionarnog merenja pojedinačnih motorskih parametara.

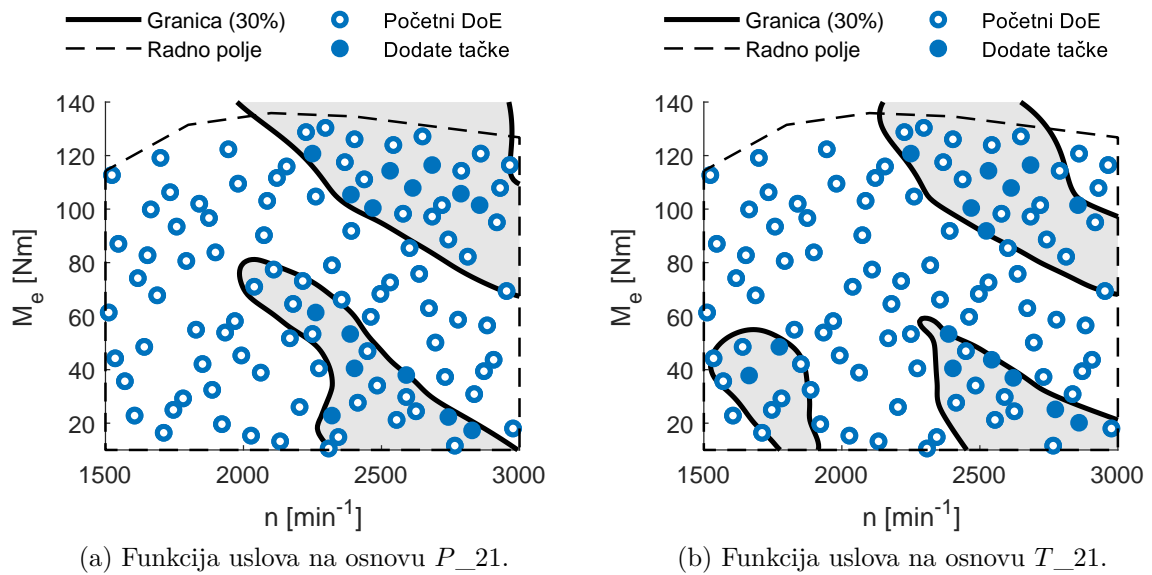


Slika 8.16.: Inicijalni plan ispitivanja od 30 tačaka Haltonove sekvence i dodatnih 15 tačaka unutar oblasti za dodavanje tačaka (DE 30+15).

Evaluacija referentnog modela određene motorske veličine, na tačkama ovako formiranih planova potencijalnog stacionarnog ispitivanja, obezbeđuje podatke na osnovu kojih je moguće napraviti seriju matematičkih aproksimativnih modela, na identičan način, kao što je to urađeno u poglavlju 8.1.



Slika 8.17.: Inicijalni plan ispitivanja od 60 tačaka Haltonove sekvence i dodatnih 15 tačaka unutar oblasti za dodavanje tačaka (DE 60+15).



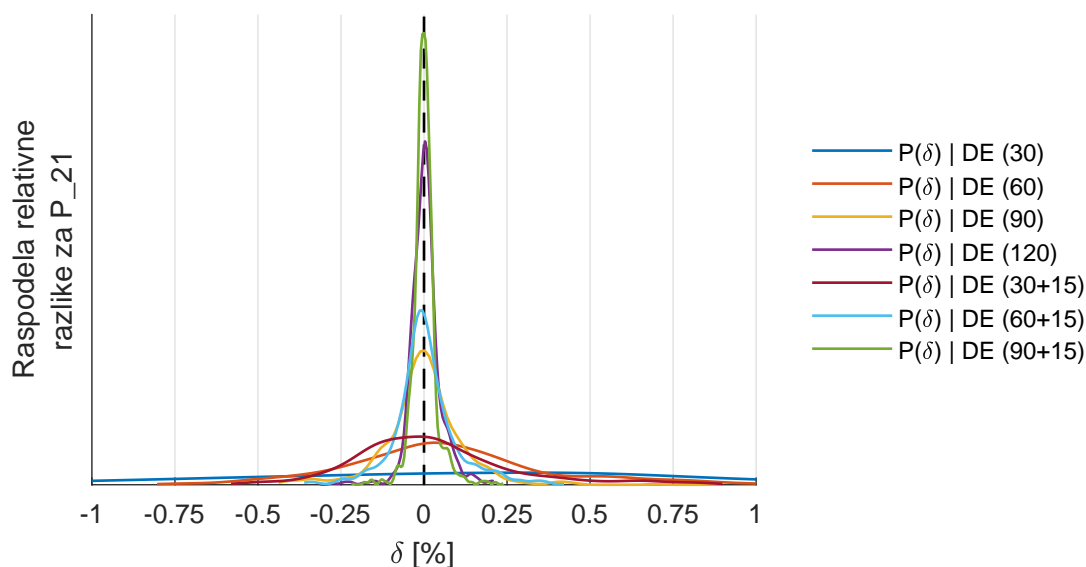
Slika 8.18.: Inicijalni plan ispitivanja od 90 tačaka Haltonove sekvence i dodatnih 15 tačaka unutar oblasti za dodavanje tačaka (DE 90+15).

8.4. Poređenje modela formiranih na osnovu proširenog plana ispitivanja

Odabir aproksimativnog modela koji opisuje promenu izlazne veličine sa prihvatljivim vrednostima statističkih parametara, u smislu srednjeg kvadratnog odstupanja i dobre generalizacije, sproveden je u okviru programskog okruženja za MZK. Osnovne karakteristike modela formiranih pri analizi pritiska u usisnom kolektoru motora P_{21} prikazane se u tabeli 8.5. Nadogradnja histograma 8.5 raspodelama relativne razlike referentnog modela i modela formiranih na osnovu plana ispitivanja sa dodatim tačkama unutar karakterističnih oblasti je prikazana na slici 8.19.

Opis modela	Broj tačaka (training+val.)	Tip modela	Tip funkcije jezgra	Param./ Max. c.	Std. dev. PRESS	Std. dev.	AICc
#1 DE+15	45 (36+9)	Hibridna FRO	<i>Recmultiquadratic</i> ³	26/40	4.053e-3	2.083e-3	-451
#2 DE+15	75 (60+15)	Hibridna FRO	Vendland (C2)	48/55	1.468e-3	6.759e-4	-896
#3 DE+15	105 (84+21)	Hibridna FRO	Vendland (C4)	63/100	6.177e-4	2.937e-4	-1468

Tabela 8.5.: Osnovne karakteristike i statistički parametri matematičkih modela koji opisuju promenu pritiska u usisnom kolektoru motora (P_{21}).



Slika 8.19.: Raspodela relativnih razlika parametra P_{21} za referentni model i modele formirane nad osnovnim DE i planom ispitivanja sa dodatim tačkama.

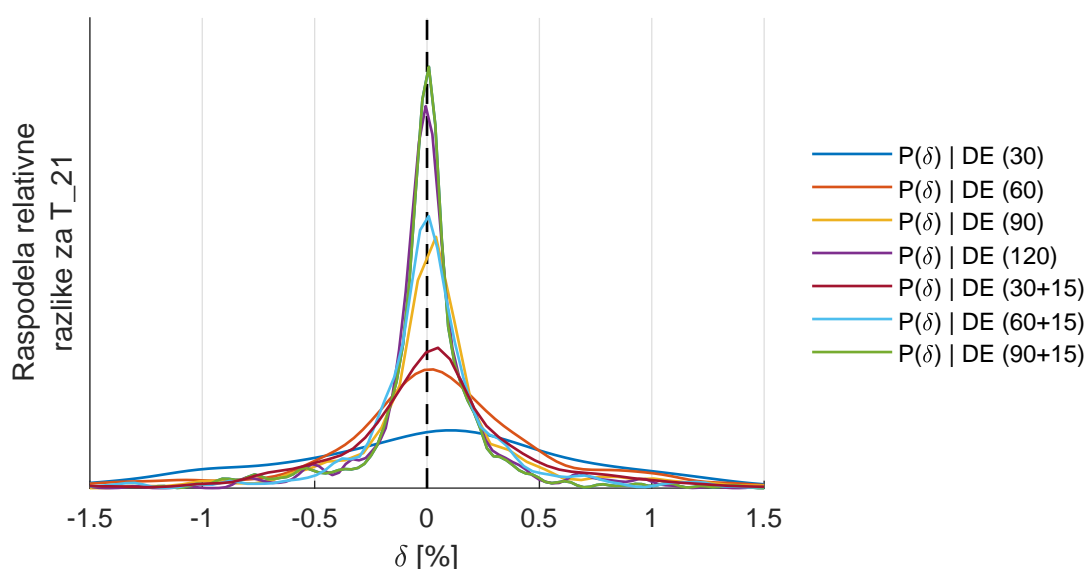
³Inverzna multikvadratna funkcija

Primećuje se da aproksimativni modeli formirani na osnovu proširenog seta tačaka imaju manje rasipanje posmatrano sa aspekta ukupanog broja tačaka dizajna. Tako na primer, model koji je formiran na osnovu 60 tačaka Haltonove sekvence ima veće rasipanje od modela koji ima ukupno 45 tačaka (30 osnovnih i 15 posebno izabranih). U ovom slučaju je broj tačaka potencijalnog stacionarnog ispitivanja 25% manji od osnovnog, a rezultati su povoljniji. Sa povećanjem broja tačaka plana ispitivanja generalni kvalitet aproksimacije je sve povoljniji, što je i očekivano, ali i dalje su precizniji modeli formirani putem plana ispitivanja koji sadrži dodatne tačke unutar oblasti viših vrednosti drugog izvoda posmatrane promene.

Identični zaključci važe i prilikom razmatranja temperature usisnog vazduha merene na izlaznom preseku kompresora T_{21} . Osnovni statistički podaci formiranih aproksimativnih modela su prikazani u tabeli 8.6, a adekvatne raspodele relativne razlike između referentnih i ostalih modela, su date na slici 8.20.

Opis modela	Broj tačaka (trening+val.)	Tip modela	Tip funkcije jezgra	Param./Max. c.	Std. dev. PRESS	Std. dev.	AICc
#1 DE+15	45 (36+9)	Hibridna FRO	<i>Thinplate</i>	26/25	0.277e-3	0.16e-3	-71
#2 DE+15	75 (60+15)	Hibridna FRO	Multikvadratna	45/55	0.155	0.086	-195
#3 DE+15	105 (84+21)	Hibridna FRO	<i>Thinplate</i>	60/77	0.133	0.062	-381

Tabela 8.6.: Osnovne karakteristike i statistički parametri matematičkih modela koji opisuju promenu temperature u usisnom kolektoru motora (T_{21}).



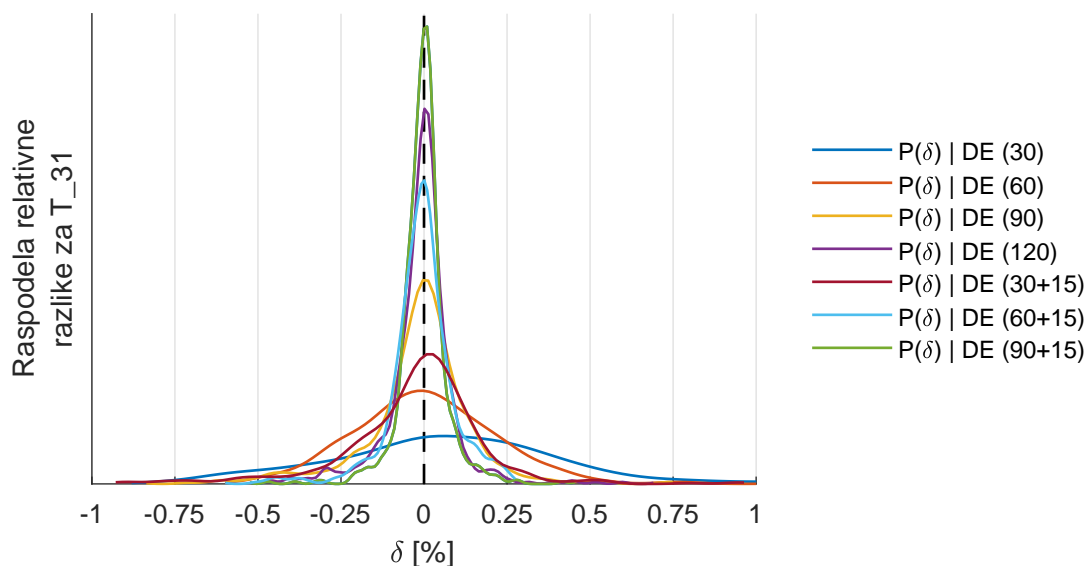
Slika 8.20.: Raspodela relativnih razlika parametra T_{21} za referentni model i modele formirane nad osnovnim DE i planom ispitivanja sa dodatim tačkama.

Iako je sa povećanjem broja tačaka ukupno rasipanje prikazanih relativnih razlika sve manje, primećuje se da modeli formirani na osnovu seta osnovnih i dopunski izabranih tačaka bolje opisuju izlaznu promenu, u poređenju sa pojedinim modelima koji su formirani sa većim brojem tačaka osnovnog plana ispitivanja.

Ako se uzme u razmatranje temperatura izduvnih gasova merena na ulaznom preseku turbine (T_{31}), a čije je merenje u stacionarnim uslovima ispitivanja relativno inertno i zahteva povećano vreme stabilizacije, dobijaju se gotovo identični rezultati kao i pri analizi merenja pritiska ili temperature u usisnom kolektoru motora. Opis primenjenog aproksimativnog modela i osnovni statistički podaci dati su u tabeli 8.7. Histogram sa slike 8.21 potvrđuje prednosti ciljanog dodavanja tačaka za potencijalno stacionarno ispitivanje unutar oblasti radnog polja motora koje karakteriše veća vrednost funkcije uslova za dodavanje tačaka posmatrane izlazne veličine.

Opis modela	Broj tačaka (trening+val.)	Tip modela	Tip funkcije jezgra	Param./ Max. c.	Std. dev. PRESS	Std. dev.	AICc
#1 DE+15	45 (36+9)	Hibridna FRO	<i>Thinplate</i>	29/32	0.421	0.168	-15
#2 DE+15	75 (60+15)	Hibridna FRO	Kubni splajn	43/40	0.313	0.151	-130
#3 DE+15	105 (84+21)	Hibridna FRO	Vendland (C2)	55/55	0.263	0.128	-271

Tabela 8.7.: Osnovne karakteristike i statistički parametri matematičkih modela koji opisuju promenu temperature u izduvnom kolektoru motora (T_{31}).



Slika 8.21.: Raspodela relativnih razlika parametra T_{31} za referentni model i modele formirane nad osnovnim DE i planom ispitivanja sa dodatim tačkama.

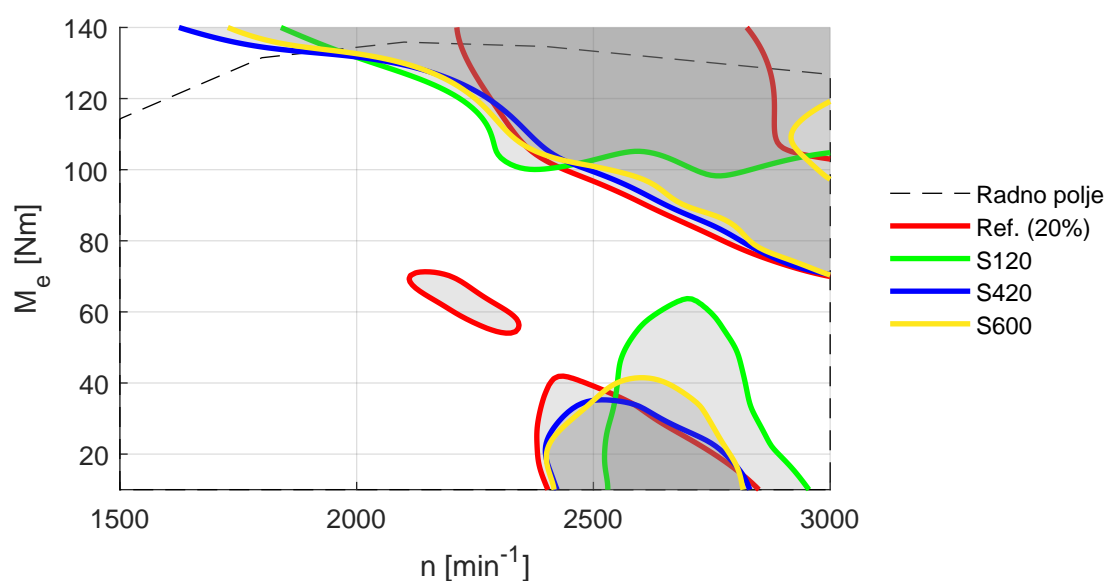
Treba napomenuti da rezultati prikazani u okviru ovog poglavlja odgovaraju isključivo analizi referentnih stacionarnih modela formiranih na osnovu rezultata stacionarnih ispitivanja motora. Oblasti za dodavanje tačaka početnom planu ispitivanja određene su na osnovu poznatih modela koji opisuju stacionarnu promenu datog parametra. U realnosti, takav scenario može da posluži eventualnom poboljšanju stacionarnog modela nakon izvršenog ispitivanja po osnovnom planu. Ideja formiranja kvalitetnijeg plana ispitivanja pre nego što započne proces stacionarnog ispitivanja motora biće data u narednom poglavlju kroz analizu rezultata ispitivanja sa SDN.

8.5. Oblasti za dodavanje tačaka određene ispitivanjem sa SDN

S obzirom na to da je cilj ispitivanja određivanje stacionarnih odziva merenih motorskih veličina na osnovu unapred pripremljenog plana ispitivanja, postavlja se pitanje da li, i na koji način takav plan ispitivanja može da se unapredi kako bi se njegovim sprovođenjem na probnom stolu dobile preciznije konačne aproksimacije posmatranih veličina. Na početku procesa ispitivanja, stacionarni odzivi su nepoznati, tako da nije moguće odrediti vrednosti funkcije uslova za dodavanje tačaka i tako realizovati proceduru opisanu u poglavlju 8.3, ali načelne promene ovog tipa mogu da se utvrde dinamičkim ispitivanjem motora promenom postupka sa SDN. Na taj način bi se, u većoj ili manjoj meri, identifikovale oblasti za dodavanje tačaka i povećao potencijal inicijalnog plana stacionarnog ispitivanja.

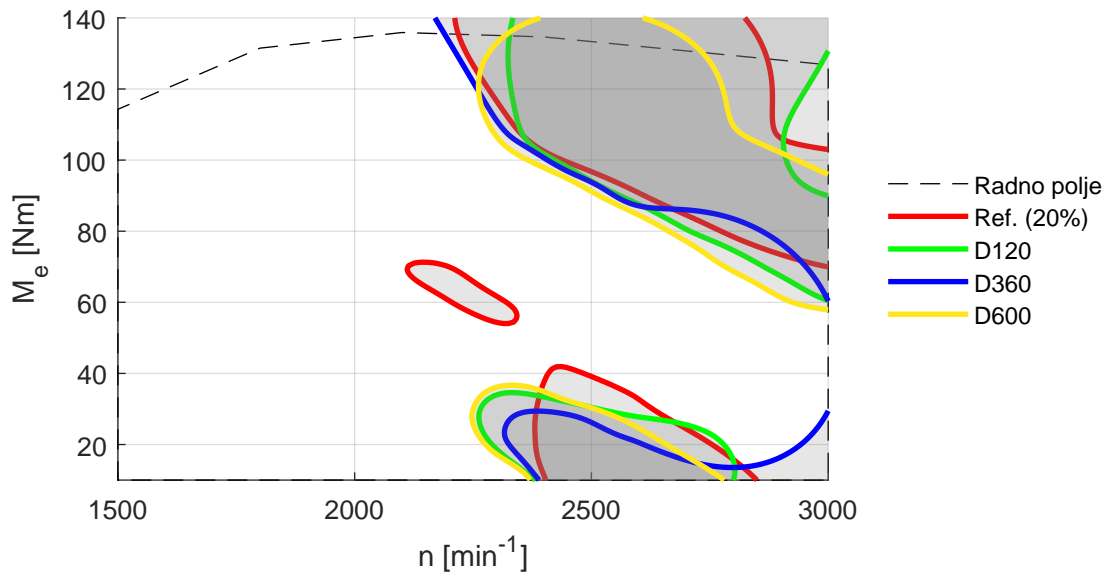
Srednja linija ovojnice ispitivanja sa SDN na karakteristikama opterećenja služi kao osnova za dalju analizu. Rezultati takvog približenja za dinamičke testove sa stacionarnom i dinamičkom pripremom sistema prikazani su u okviru poglavlja 7. Iako postoje određene razlike u poređenju sa stacionarnim modelima, informacije sadržane u ovakvim aproksimacijama mogu da se iskoriste pri određivanju oblasti za dodavanje tačaka. Određivanjem funkcije uslova za dodavanje tačaka i izo-konture koja deli radno polje i time definiše konkretnu oblast, može da se napravi poređenje između rezultata dobijenih na osnovu testova sa SDN različitog trajanja i različitog načina pripreme sistema. Na dijagramima koji slede nisu prikazani rezultati svih ispitivanih dinamičkih sekvenci, već je izabran najkraći, srednji i najduži test sa SDN. Takođe, procenat oblasti za dodavanje tačaka je postavljen na 20% ukupne površine radnog polja motora, jer se na taj način bolje naglašavaju eventualna odstupanja pozicija ovih oblasti.

Analizom vrednosti pritiska u usisnom kolektoru motora za dinamička ispitivanja koja počinju stacionarnim radnim režimom, a čija je postavka data u poglavlju 6.3.1, dobijaju se oblasti za dodavanje tačaka prikazane na slici 8.22. Merni lanac za merenje pritiska karakteriše relativno brz odziv, tako da su pozicije dobijenih oblasti slične onoj koja se dobija kao rezultat analize stacionarnog ispitivanja. Primećuje se da aproksimacija određena na osnovu dinamičkog ispitivanja sa najsporijom promenom upravljačkog parametra (najduži test) ima relativno dobro poklapanje sa stacionarnom aproksimacijom, dok za test sa oznakom S120 postoji samo delimično prekalapanje.



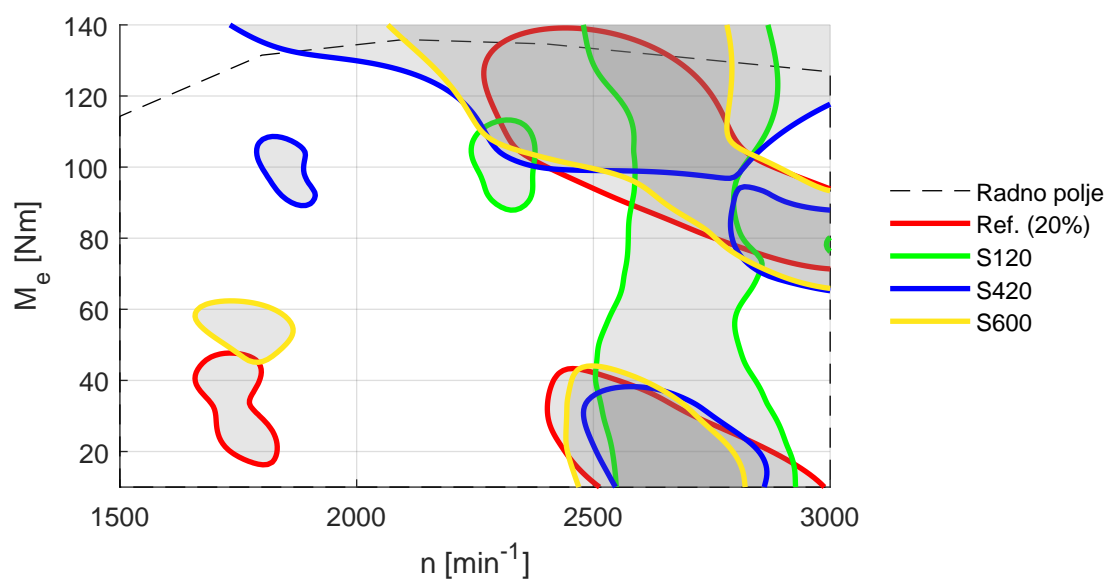
Slika 8.22.: Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema za parametar P_{21} .

Na slici 8.23 prikazano je prekalapanje oblasti za dodavanje tačaka unutar radnog polja motora određenih na osnovu rezultata ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema za parametar P_{21} . Primećuje se da je preklapanje karakterističnih oblasti bolje nego u slučaju testa sa SDN koji započinje stacionarnim režimom. Aproksimativni model formiran nad podacima dobijenim sprovođenjem najkraćeg testa sa SDN, D120, ima dobro preklapanje sa oblasti određenom na osnovu stacionarnog modela.

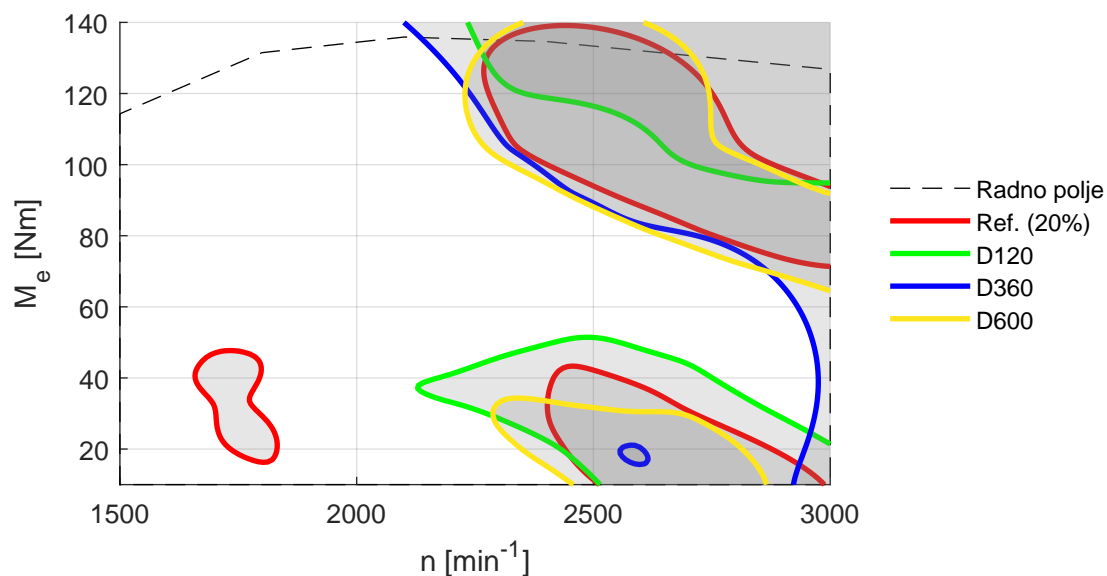


Slika 8.23.: Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema za parametar P_{21} .

Pri razmatranju rezultata dobijenih analizom aproksimativnih modela temperature usisnog vazduha, moguće je iscrtati pozicije oblasti za dodavanje tačaka kao što je to prikazano na slici 8.24. U poređenju sa signalima merenog pritiska, kašnjenje merenog parametra T_{21} je najvećim delom posledica relativno sporog uspostavljanja ravnoteže pri razmeni toplote u čitavom lancu prenosa toplotne energije, ali i zahvaljujući upotrebi senzora znatno veće vremenske konstante. Sa druge strane, amplitude promene su značajno manje nego što bi to bio slučaj prilikom merenja temperature izduvnih gasova. Kao posledica ove činjenice, primećuje se relativno dobro poklapanje karakterističnih oblasti na osnovu rezultata testa sa SDN i rezultata dobijenih putem referentnog stacionarnog modela. Sa produženjem trajanja dinamičkog testa sa stacionarnom pripremom dobijaju se bolja poklapanje karakterističnih oblasti. Za razliku od testa sa oznakom S120, kada se analizira najbrži test sa SDN i dinamičkom pripremom sistema (D120 prikazan na slici 8.25), primećuje se veoma dobro poklapanje sa oblašću za dodavanje tačaka formirane na osnovu referentnog stacionarnog modela. U ovom slučaju postoje tri odvojene oblasti unutar kojih bi bilo poželjno dodati tačke, a rezultatima najbržeg dinamičkog ispitivanja su identifikovane dve dominantne oblasti. Ukoliko se algoritam za dodavanje tačaka podesi tako da prioritet imaju tačke koje karakteriše maksimalna vrednost minimalne udaljenosti od ostatka populacije, konačni rezultati aproksimativnog modela će bolje opisivati stacionarni realni proces.



Slika 8.24.: Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom (SP) sistema za parametar T_{21} .

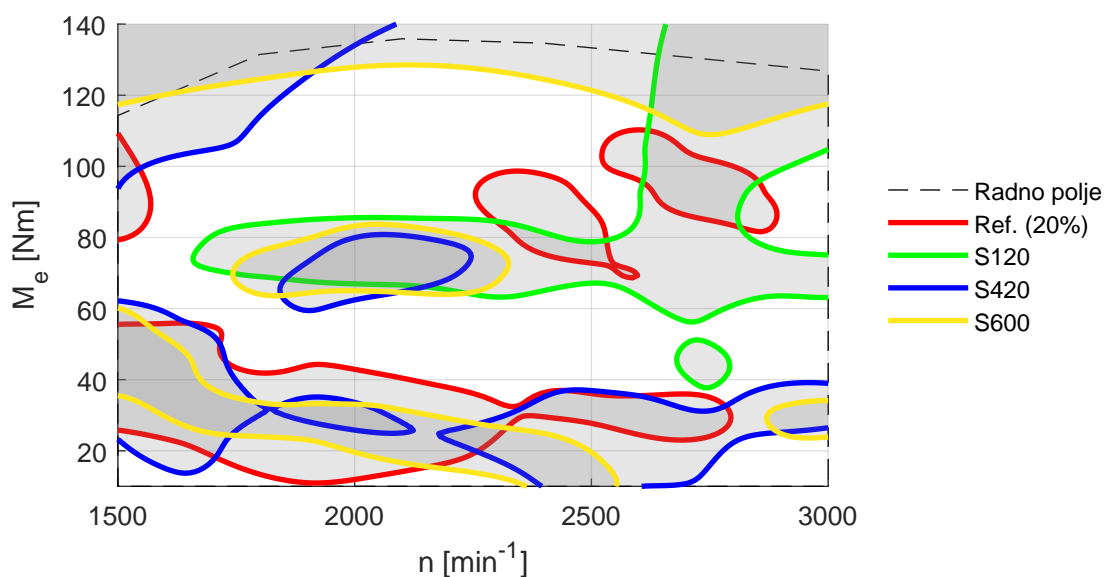


Slika 8.25.: Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom (DP) sistema za parametar T_{21} .

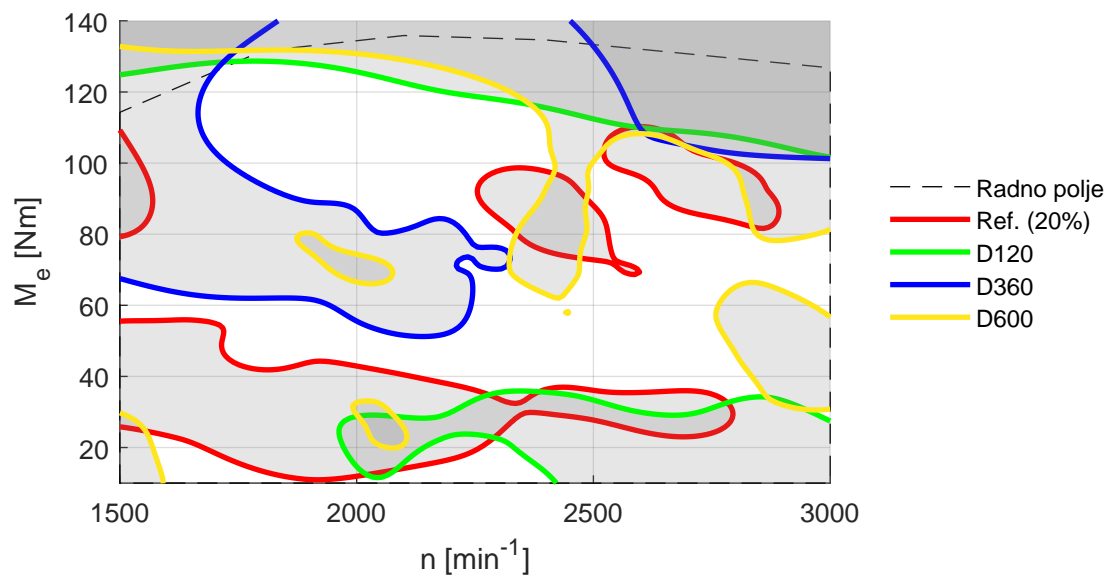
Kao što je naglašeno, prilikom ispitivanja motora, merenje temperature i sastava izduvnih gasova je nepovoljno sa aspekta potrebnog vremena stabilizacije. Na tržištu postoje sistemi za izuzetno brzu analizu ovih veličina koji omogućavaju pouzdano

praćenje promena na ciklusnom nivou [161, 162, 163], ali prilikom ovog istraživanja su korišćene konvencionalne metode merenja temperature T_{31} , a sastav izduvnih gasova nije meren. Na dijagramu 8.26 prikazane su oblasti za dodavanje tačaka dobijene analizom testa sa SDN i stacionarnom pripremom. Nažalost, za ovako inertna merenja, zaključci izvedeni na osnovu promene izlazne veličine u dinamičkim uslovima ispitivanja, ne daju dobre rezultate.

Ako se posmatraju oblasti definisane na osnovu referentnog modela, i ponovo razmotri histogram sa slike 8.21, ideja dodavanja tačaka u ovim oblastima je ispravna, ali te oblasti ne mogu pravilno da se identifikuju ispitivanjem sa SDN. Isti zaključak se odnosi i za ispitivanja sa dinamičkom pripremom sistema, a čiji su rezultati prikazani na slici 8.27. Očekivano je da najsporiji dinamički testovi, oznaka S600 i D600, makar približno identifikuju oblasti za dodavanje tačaka, ali to nije slučaj, jer je promena temperature izduvnih gasova približno konstantna na čitavom radnom području motora. Kao posledica toga funkcija uslova za dodavanje tačaka ima više lokalnih maksimuma (i minimuma) i ne može jednoznačno da se identifikuje oblast za dodavanje tačaka.



Slika 8.26.: Oblasti za dodavanje tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i stacionarnom pripremom sistema za parametar T_{31} .



Slika 8.27.: Oblasti za dodavne tačaka dobijene na osnovu rezultata stacionarnog ispitivanja i ispitivanja sa SDN i dinamičkom pripremom sistema za parametar T_{31} .

9. Redosled sprovođenja stacionarnih radnih režima tokom ispitivanja

U prethodnim poglavljima je razmotren uticaj broja tačaka plana stacionarnog ispitivanja na kvalitet konačne stacionarne aproksimacije pojedinih merenih efektivnih veličina. Takođe, prikazan je način određivanja osnovnih pravaca prostiranja radnih režima unutar radnog područja motora. Sprovođenjem relativno brzih dinamičkih testova, i analizom tako snimljenih podataka, date su preporuke za određivanje oblasti radnog prostora unutar kojih bi bilo poželjno povećati broj radnih režima, kako bi konačna aproksimacija preciznije opisivala realnu fizičku promenu. Zaključeno je da, sa redukovanim brojem tačaka plana ispitivanja i njihovim pravilnim izborom, može da se dođe do kvalitetnih rezultata uz uštedu vremena potrebnog za stacionarno ispitivanje šireg opsega.

Uz pretpostavku da postoji dovoljno dobar plan ispitivanja, dalje uštede vremena prilikom njegovog sprovođenja mogu da se obezbede ukoliko se odredi povoljan redosled izvršavanja radnih režima. Kao što je naglašeno u poglavlju 4.1, kriterijum stabilizacije radnog režima je određen veličinom promene najinertnijeg parametra, a u opštem slučaju to je temperatura izduvnih gasova motora. Kako bi se sprovela jedna ovakva analiza, neophodan je određeni nivo predznanja o ispitivanom objektu. U tom smislu, rezultati ispitivanja sa SDN predstavljaju odličnu osnovu.

Iako su na dijagramima 8.26 i 8.27 prikazani praktično neupotrebljivi rezultati analize oblasti za potencijalno dodavanje tačaka pri stacionarnom ispitivanju parametra T_{31} , u nastavku će biti prikazano kako rezultati ispitivanja sa SDN ovog parametra mogu da se upotrebe pri određivanju redosleda radnih režima datog plana ispitivanja. Osnovna ideja je pronalaženje takvog redosleda stacionarnih radnih režima, prilikom čije realizacije se dobija najmanji otklon temperature izduvnih gasova motora, što za posledicu ima najkraće vreme stabilizacije radnog režima.

9.1. Postavka „Problema trgovačkog putnika”

Određivanje povoljnog redosleda izvršavanja radnih režima, prema nekom unapred definisanom kriterijumu, spada u kategoriju problema optimizacije pod nazivom „Problem trgovačkog putnika” (u daljem tekstu PTP, eng.: *TSP - Travelling Salesman Problem*). Iako je autor ovog problema nepoznat, zna se da datira sa početka 19. veka i da potiče iz zemalja centralne Evrope. Osnovna formulacija glasi:

- Za dati spisak gradova i njihove međusobne udaljenosti, koji bi bio najkraći mogući put, takav da se svaki grad poseti samo jednom i da se po završenom obilasku svih gradova trgovac vrati u grad iz koga je krenuo?

Matematička formulacija je prvi put proučavana tridesetih godina prošlog veka, i od tada PTP predstavlja jedan od najčešće razmatranih problema numeričke optimizacije [164]. Tada su razvijani algoritmi za određivanje mogućih rešenja i zaključeno je da ne postoji način za apsolutno tačno rešavanje ovog problema osim iscrpne pretrage. Problem je takav da ne može da se definiše pravilo kojim bi se broj pokušaja za pronalaženje rešenja sveo na broj manji od ukupnog broja rešenja, odnosno ukupnog broja kombinacija putanja.

Postoji više različitih matematičkih formulacija PTP, a osnovna je formulacija Dancig-Falkerson-Džonson (Dantzig-Fulkerson-Johnson) [165] sledećeg oblika:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (9.1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9.3)$$

$$\sum_{i \in S, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad S \subset \{1, 2, \dots, n\} \quad (9.4)$$

$$x_{ij} = 0 \vee 1, \quad \forall i, j \quad (9.5)$$

za čvorove i i j , međusobne udaljenosti $d(i, j)$ i za koeficijent x_{ij} koji uzima vrednosti $x_{ij} = 1 \vee 0$ u zavisnosti od toga da li ruta između čvorova i i j pripada krajnjoj optimalnoj putanji ili ne. Prva jednačina definiše da je neophodno izvršiti minimizaciju ukupne distance, sledeće dve jednačine ograničavaju broj grana svakog čvora, na jednu dolaznu i jednu odlaznu granu. Jednačina 9.4 onemogućava stvaranje podruta, odnosno ruta koje sadrže manji broj čvorova (gradova) od ukupno n čvorova.

Postoje i drugačije formulacije PTP, kao što je Miler-Taker-Cemlin (Miller-Tucker-Zemlin) [166] formulacija, ali i brojne druge postavke. Podela složenijih PTP može da se okarakteriše:

- Postavkom kod koje je putanja između dve tačke asimetrična, odnosno putanja između tačaka A i B nije ista kao i putanja u suprotnom smeru (od tačke B do tačke A). U realnim uslovima putujućeg trgovca, ovakav uslov bi odgovarao jednosmernoj ulici;
- Dozvoljenom višestrukom posetom iste tačke - čvora. S obzirom na to da se generalizovani PTP koristi pri određivanju optimalne rute vozila (eng.: *VRP* - *Vehicle Routing Problem*), ovakva postavka bi odgovarala višestrukoj poseti magacina ili skladišta sa robom koju je potrebno dostaviti u preostale gradove;
- Višestrukim prolaženjem istom putanjom. U ovom slučaju, razapinjuće stablo minimalnog stepena [167] sastavni je deo postavke, ali odnos između broja grananja i ukupnog pređenog puta je nepoznata veličina prilikom postavljanja problema. Razgranatost minimalnog stepena (eng.: *Minimum Spanning Tree*) se dobija kada se nad rezultatom Delonijeve triangulacije *DT*, spoje tačke između kojih se nalazi najkraća putanja (najkraće stranice trouglova).
- Otvorenim PTP kod kojih „trgovac” ne mora da se vrati u početnu tačku, već optimalna putanja zavisi od početne tačke. Ovakva postavka ima onoliko puta više kombinacija putanja od klasičnog PTP, koliko ima tačaka u razmatranom planu ispitivanja, odnosno spisku gradova.

U praksi, PTP ima brojne primene pri projektovanju logistike i optimizaciji proizvodnih procesa. Kao što je broj tačaka (gradova) jedan od parametara pri definisanju problema, vrednosti koje kvantifikuju odnose između njih (udaljenje) mogu da budu izražene kroz novac, vreme ili neki drugi parametar. U slučaju koji će ovde biti razmatran, to su broj radnih režima n i temperatura izduvnih gasova motora T_{31} . S obzirom na to da prilikom stacionarnog ispitivanja motora nema potrebe da se radni režim ponavlja vraćanjem na početni, razmatraće se slučaj otvorenog PTP. Takođe, ponavljanje jednog ili više radnih režima nije od interesa (čvorovi ili grananje), tako da ukupan broj potencijalnih redosleda za izvršavanje plana ispitivanja može da se opiše jednačinom:

$$N = \frac{n!}{2} \quad (9.6)$$

gde je n broj tačaka razmatranog plana ispitivanja, a deljenje sa 2 je posledica formiranja identičnih putanja, samo suprotnog redosleda. Za plan ispitivanja od $n = 45$ tačaka (DE 30+15 prikazan na slici 8.16a), dobija se okvirno $N \approx 6 \cdot 10^{55}$ potencijalnih kombinacija redosleda izvršavanja. Rešavanje PTP putem numeričke iscrpne pretrage spada u kategoriju algoritama faktorijelne zavisnosti trajanja izvršavanja u funkciji broja parametara kao:

$$E = O(n!) \quad (9.7)$$

gde O predstavlja Landauov simbol (Edmund Landau), odnosno asimptotsku tendenciju funkcije E koja u opštem slučaju reprezentuje ukupan broj elementarnih operacija korišćenog algoritma. Prema računarskoj teoriji kompleksnosti, određivanje rešenja primenom optimizacione metode dinamičkog programiranja, kojom se generalni problem raščlanjuje na više jednostavnijih problema, može da se obezbedi tačan rezultat u okvirima eksponencijalnog vremena izvršavanja algoritma:

$$E = O(k^n) \quad (9.8)$$

gde je k pozitivna konstanta. Eksponencijalna zavisnost trajanja izvršavanja algoritma je povoljnija od faktorijalne zavisnosti. Za konačan broj iteracija iz primera ($N \approx 6 \cdot 10^{55}$), razmotrimo jednostavan Matlab-skript prikazan u nastavku, kojeg karakteriše eksponencionalno vreme izvršavanja u funkciji N :

```
clear
tic
parfor i = 1 : 6*10^55
    % prazna petlja
end
toc
```

Jedini zadatak ovog programa bio bi da u paralelnoj petlji inkrementira brojač do navedene vrednosti. Na procesoru koji može da postigne oko $45 \cdot 10^9$ instrukcija u sekundi (A.10), eksponencijalno vreme izvršavanja je procenjeno na oko $8.16 \cdot 10^{34}$ godina. S obzirom na to pravi program za rešavanje PTP sadržao bi određene osnovne operacije (sabiranje, množenje, deljenje, poređenje brojeva itd.) u svakom prolazu petlje, stvarno vreme izvršavanja bi bilo značajno duže. U praksi, algoritmi iscrpne pretrage ne mogu da se realizuju u prihvatljivom vremenskom roku i iz tog razloga se razvijaju različite heurističke metode za približno određivanje optimalnog rešenja [168] ovog problema.

Sledeća, brža kategorija algoritama, koja u najgorem slučaju može da ima eksponencionalno vreme izvršavanja, zasniva se na iterativnom poređenju trenutne i prethodno pronađene najbolje putanje. Ovakav algoritam spada u grupu algoritama polinomskog vremena izvršavanja, a broj elementarnih operacija može da se formuliše kao:

$$E = O(n^p) \quad (9.9)$$

U zavisnosti od vrednosti pozitivne konstante p , odnosno kompleksnosti primenjene heurističke metode i kvaliteta optimizacije računarskog kôda, algoritmi polinomskog vremena izvršavanja mogu da obezbede približno tačno rešenje u prihvatljivom vremenu. Ukoliko je postavka problema jednostavnija (manji broj gradova), heurističke metode mogu da odrede i tačno rešenje. Sa druge strane, ovakve metode su veoma moćne, jer približno rešavaju i najkompleksnije probleme. Takav primer je Svetsko takmičenje u formiranju algoritma za PTP za trgovca koji treba da obiđe sve gradove na svetu (oko 2 miliona gradova) [169].

Najjednostavniji algoritmi zasnivaju se na lokalnoj optimizaciji putanje. Upravo iz tog razloga, nisu u mogućnosti da globalno optimizuju problem [170], a najpoznatiji među njima su:

- Algoritam *najbližeg suseda* kod koga se za inicijalno izabranu tačku pronalazi sledeća najbliža tačka i time sukcesivno formira ruta;
- Algoritam *najjeftinijeg ubacivanja* kod koga se za početnu delimičnu putanju (formiranu između prve dve tačke sekvence), svaka sledeća tačka ubacuje na mestu najbliže deonice putanje, odnosno rute između dve tačke;
- Algoritam *najbližeg ubacivanja* kod koga je neophodno izabrati inicijalnu rutu (između dve tačke) i potom, u iterativnom postupku, ubacivati novu tačku, koja je od svih tačaka (koje nisu sastavni deo rute) najbliža postojećoj delimičnoj ruti.

Sledeća kategorija, nešto složenijih algoritama, kao što su Kristofidesov algoritam, zamena ruta u paru (2-OPT) i kategorija primenjenog genetskog algoritama, će biti detaljnije objašnjeni u nastavku.

9.1.1. Kristofidesov algoritam

Kristofidesov algoritam, čijom primenom može da se odredi približno optimalno rešenje za PTP, spada u kategoriju algoritama koji zahtevaju redukovanu iscrpnu pretragu. Osnovni koraci ovog algoritma su sledeći:

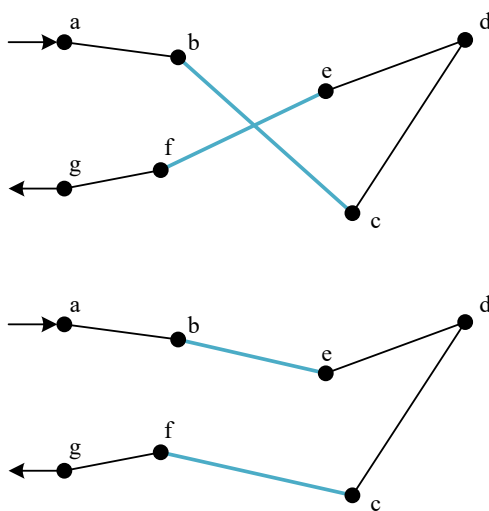
- Određivanje Delonijeve triangulacije DT i tačaka koje čine stablo minimalnog stepena razgranatosti T povezivanjem najkraćih stranica DT [171];
- Određivanje perfektnog poklapanja M [172], tačaka populacije koje poseduju neparan broj potencijalnih putanja (krajnje tačke i čvorovi), odnosno linija koje posmatranu tačku povezuju sa ostalim tačkama. Perfektno poklapanje predstavlja povezivanje parova tačaka populacije, tako izabranim linijama sa kojima nijedna druga tačka populacije nije kolinearna. S obzirom na to da svaka stranica, odnosno putanja mora da ima svoju tačku početka i kraja, to ukazuje da je broj stranica perfektnog poklapanja najviše duplo manji nego ukupan broj tačaka;
- Kombinovanje stranica dobijenog perfektnog poklapanja M i Euklidovog stabla minimalnog stepena razgranatosti T [173] kako bi se odredio višestruki grafikon G . Višestruki grafikon predstavlja bazu potencijalnih putanja kod koga parovi tačaka mogu da budu povezani sa takozvanim paralelnim, odnosno višestrukim vezama [174];
- Na osnovu informacija sadržanih u višestrukome grafikonu G , određuje se Ojlerova putanja koja povezuje sve tačke populacije tako da svaka tačka ima paran broj povezivanja. Na ovaj način se povezuju sve tačke populacije i putanja se zatvara vraćanjem na početnu tačku. Kako bi se izbeglo dvostruko posećivanje iste tačke, pronađena Ojlerova putanja [175] se pojednostavljuje svođenjem na Hamiltonovu putanju [176] kod koje se zaobilaze tačke koje su već postale deo putanje. Time svaka tačka ima samo dva povezivanja (dolaznu i odlaznu putanju).

Osnova Kristofidesovog algoritma je sagledavanje čitave populacije tačaka, i pokušaj iznalaženja što optimalnijeg globalnog rešenja primenom kompleksnih matematičkih aparata. U literaturi [177] postoje matematički dokazi o kvalitetu krajnjeg rešenja, koje u najgorem slučaju može da iznosi $3/2$ od optimalne, tj. najkraće putanje.

9.1.2. Zamena parova ruta

Zamena parova ruta ili *2-OPT* algoritam, kako se još u literaturi naziva, je jedan od najpopularnijih algoritama za rešavanje PTP. Takođe, često se naziva i Lin-Kerniganov (Lin-Kernighan) algoritam po svojim autoima [178, 179], a čine ga sledeće stavke:

- Formira se početna putanja nekom od jednostavnijih metoda, kao što je metoda najbližeg suseda ili čisto nasumičan odabir redosleda čvorova;
- Nasumičnim izborom se odaberu dve rute koje nemaju zajednički čvor, odnosno nisu jedna do druge i spoje se tako da se dobije nova putanja kao što je prikazano na slici 9.1. Treba voditi računa da se formiranjem novih ruta ne dobiju dve odvojene putanje jer se time narušava uslov dat jednačinom 9.4. Postoje varijante algoritma kod kojih se umesto nasumičnog izbora parova ruta, redom odabiraju rute koje su na nekom međusobnom udaljenju (na primer 1. i 4. deonica, potom 2. i 5. itd.). Takođe, moguća je identifikacija ruta koje se presecaju, a njihovim novim pozicioniranjem, može da se (lokalno) smanji ukupna dužina putanje;
- U iterativnom procesu se proverava da li je nova putanja kraća od prethodne i ukoliko jeste, zadržava se novi redosled čvorova u putanji.



Slika 9.1.: Zamena ruta u paru (2-OPT algoritam).

Generalni problem ovakvog određivanja optimalne putanje je ograničena mogućnost generalizacije rešenja, odnosno ne postoji način za sigurno pronalaženje global-

nog optimuma jer svaka zamena parova ruta predstavlja lokalno poređenje. Postoje složenije varijante Lin-Kerniganovog algoritama koje podrazumevaju zamenu ruta između većeg broja čvorova ($3-OPT$, $4-OPT$, $k-OPT$), što omogućava veću fleksibilnost algoritma uz zadržavanje prvobitne ideje [180, 181].

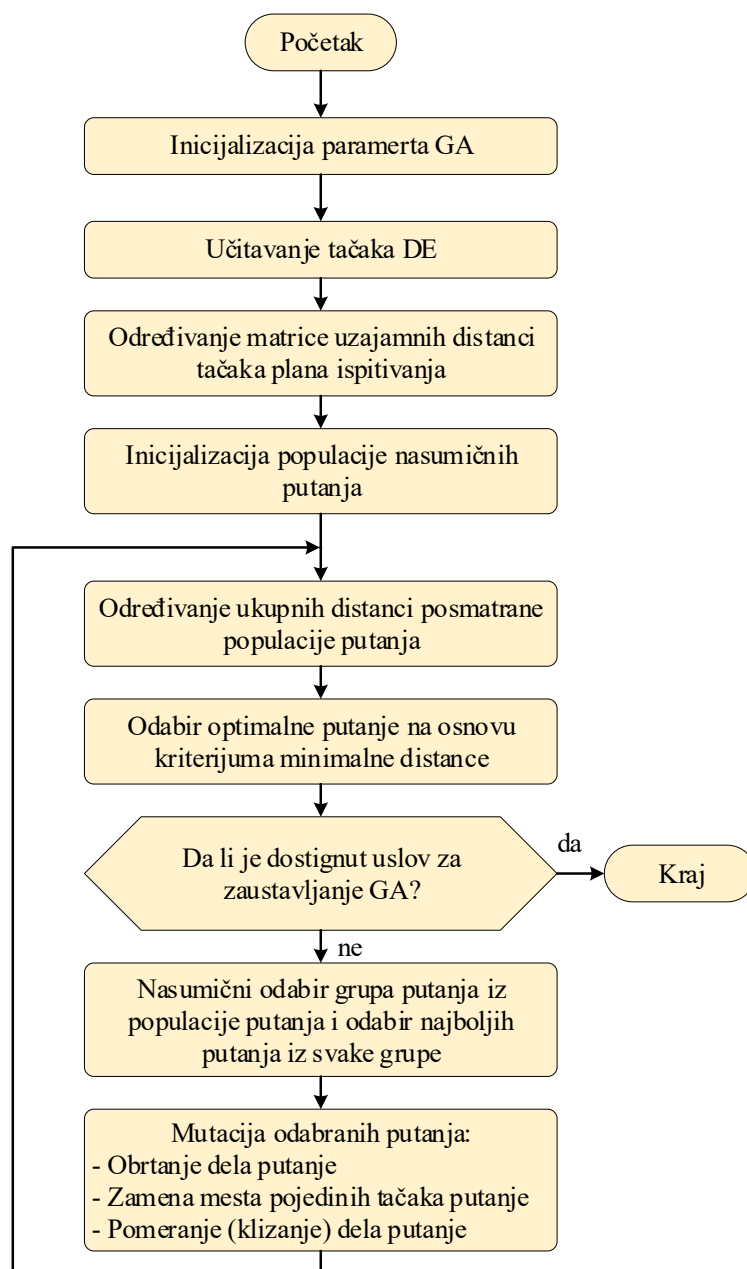
9.2. Rešavanje „Problema trgovačkog putnika” primenom genetskog algoritma

Genetski algoritmi su zasnovani na principima prirodnih procesa selekcije i evolucije [182, 183]. Za razliku od svih prethodnih načina rešavanja PTP, kod kojih se u posmatranoj iteraciji razmatra samo trenutno rešenje i njegov kvalitet, kod genetskih algoritama (GA) se vrši istovremeno pretraživanje veće populacije potencijalnih rešenja. Iz tog razloga, GA spadaju u kategoriju heurističkih pretraživačkih algoritama. Ovakvi algoritmi se često nazivaju i metaheuristički, jer se ne zasnivaju na isključivo nasumičnom traženju najboljeg rešenja, već se sprovodi sledeći niz koraka:

- Po inicijalizaciji se generiše određeni broj nasumičnih nizova čiji članovi predstavljaju indekse tačaka za koje se formira minimalna putanja. Jedan takav niz predstavlja potencijalno rešenje PTP i naziva se *vektor putanje*;
- Nakon formiranja datog broja takvih vektora, određuje se vrednost kriterijumske funkcije, tj. određuje se ukupna dužina putanje za svaki vektor putanje. Time se identifikuju bolja rešenja koja će se razmatrati u nastavku algoritma, dok se lošija rešenja odbacuju;
- Redukovan broj vektora putanje koji su prošli selekciju (roditelji), bivaju podvrgnuti takozvanim mutacijama, odnosno nasumičnim promenama čime se formiraju novi vektori putanje (potomci). Pored izmenjenih vektora putanje, u sledeću iteraciju se propuštaju i prethodni vektori putanje (roditelji), jer može da se desi da je mutacija dala negativan efekat iako početni vektor (roditelj) ima potencijal, odnosno kvalitetan *genetski kod* u smislu posedovanja delova rute koji su sastavni deo optimalnog rešenja (ili su u blizini optimalnog rešenja);
- U iterativnom procesu se vrši selekcija prema vrednosti kriterijumske funkcije i određena mutacija, čime se obezbeđuje prenošenje najboljeg genetskog materijala, odnosno delova putanje u okviru PTP, u sledeću iteraciju. Uslov za

zaustavljanje GA može da bude kontrola promene krajnjeg rešenja, ili kontrola ukupnog broja iteracija. Ukoliko je algoritam dobro podešen, nakon određenog broja iteracija, trebalo bi da se dobije dovoljno tačno rešenje (skoro optimalno).

Rešavanje problema optimalnog redosleda radnih režima motora SUS realizovana je posredstvom GA [184] čija je osnova prikazana na slici 9.2.

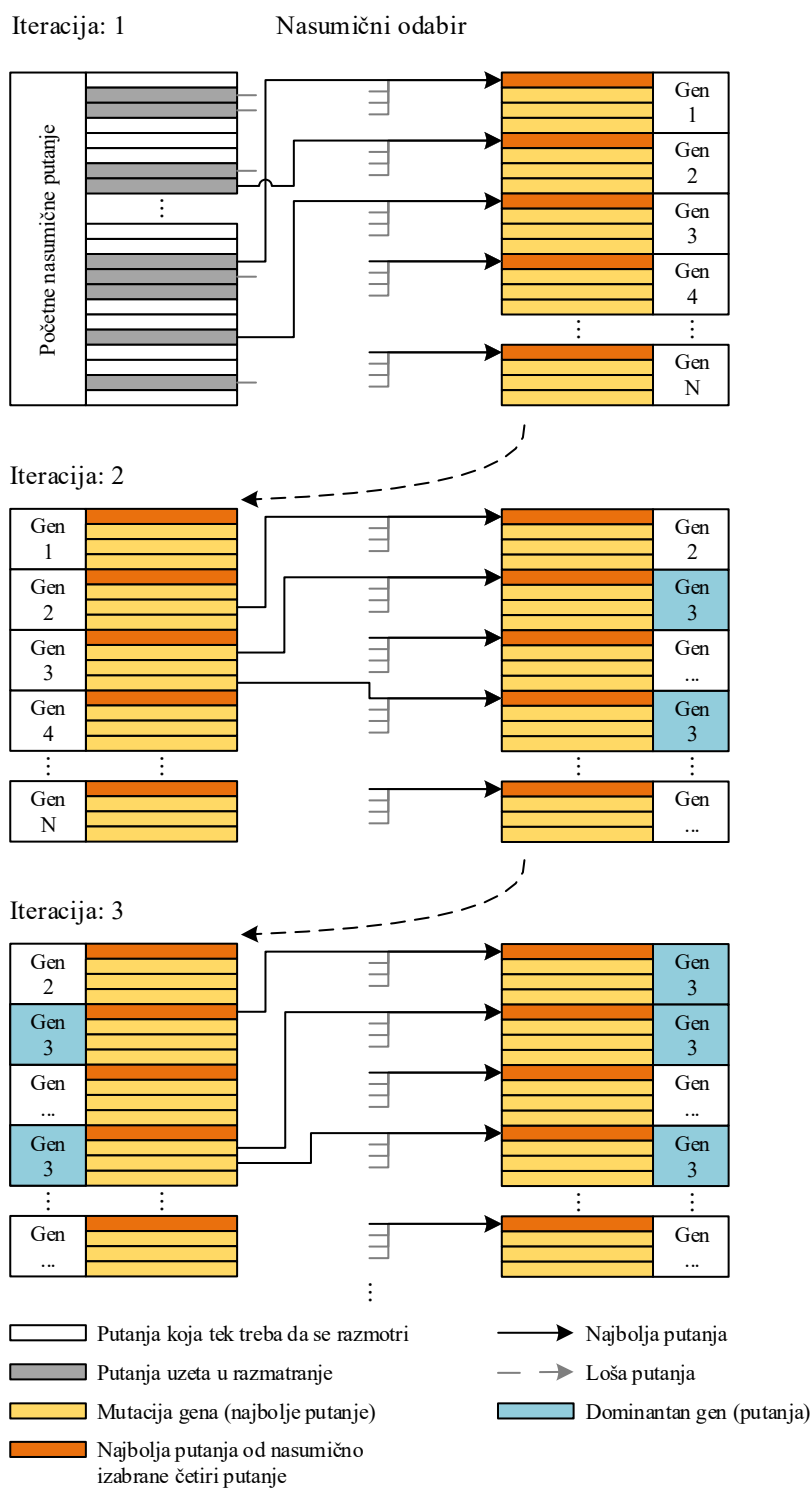


Slika 9.2.: Struktura genetskog algoritma primenjenog pri rešavanju problema optimalnog redosleda izvršavanja stacionarnih radnih režima tokom ispitivanja motora.

Iterativni postupak korišćenog GA detaljnije je prikazan na slici 9.3. Kao što je napomenuto, u prvoj iteraciji se formira P početnih vektora putanje. Nasumičnim izborom ograničenog broja putanja (u konkretnom slučaju $k = 4$) identifikuje se najbolja putanja na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije. Kada je takva putanja odabrana, odnosno kada je prošla selekciju, kvalifikuje se za sledeću iteraciju. Putanje koje nisu odabrane se odbacuju, a njihovo mesto će zauzeti određene mutacije izabrane putanje. S obzirom da je broj odabranih putanja k puta manji od inicijalnog broja vektora putanja P , na kraju prve iteracije je određeno $N = P/k$ gena nad kojima će se sprovesti mutacija. Ukupno posmatrano, svaka iteracija će imati N gena, ali zbog mehanizma izolovanja dominantnog gena (kombinacije indeksa), oznaka poslednjeg gena je izostavljena u 2. i 3. iteraciji na slici 9.3.

U drugoj iteraciji postupak selekcije se ponavlja. Ukoliko se desi da je sukcesivnim nasumičnim izborom k putanja, na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije odabrano više vektora putanje koji su potekli mutacijom specifičnog gena (Gen 3 na slici 9.3), informacije sadržane u tom genu se kvalifikuju za sledeću iteraciju na više mesta. Time je omogućen veći broj mutacija dominantnog gena. U početnom delu iterativnog procesa postoji više dominantnih kombinacija putanja, ali se posle nekoliko iteracija identifikuje jedna dominantna kombinacija koja se u svakoj sledećoj iteraciji mutira $P \frac{k-1}{k}$ puta.

Po završetku iterativnog procesa krajnja putanja nema sličnosti sa putanjom od koje su počele izmene, ali zahvaljujući relativno malim izmenama, i međusobnom poređenju vrednosti kriterijumske funkcije, svakom iteracijom GA se dobija isto ili bolje rešenje. S obzirom na veliki broj mutacija u svakom prolazu petlje i na relativno jednostavne osnovne operacije koje se koriste (sabiranje, poređenje brojeva), GA su izuzetno brzi i iznalaženje približno optimalnog rešenja se svodi na svega nekoliko sekundi rada savremenih procesora.

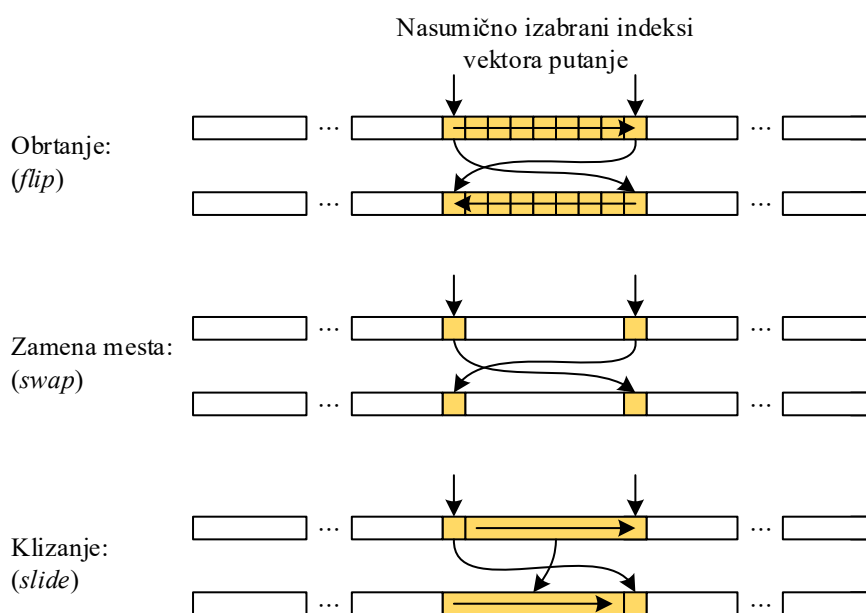


Slika 9.3.: Iterativne promene potencijalnih putanja pri rešavanju PTP i identifikacija dominantne putanje (*dominantnog gena*).

Genetski algoritmi omogućavaju visok nivo fleksibilnosti pri definisanju načina promene vektora putanje, odnosno prethodno pominjanih mutacija. Na slici 9.4 je data grafička interpretacija korišćenih metoda izmene putanje. Za odabrani vektor, nasumičnim izborom se dobijaju vrednosti dva različita indeksa na osnovu kojih se:

- Vršiti puno obrtanje elemenata vektora putanje između navedenih indeksa;
- Obavlja zamena mesta vrednosti vektora putanje na datim indeksima;
- Sprovodi fazno pomeranje dela vektora putanje uz adekvatno premeštanje jednog elementa.

Na ovaj način formira se $k - 1$ izmenjenih putanja za koje se određuje vrednost kriterijumske funkcije i sprovodi proces dalje selekcije. Sve pominjane nasumične izbore karakteriše uniformna raspodela funkcije verovatnoće.

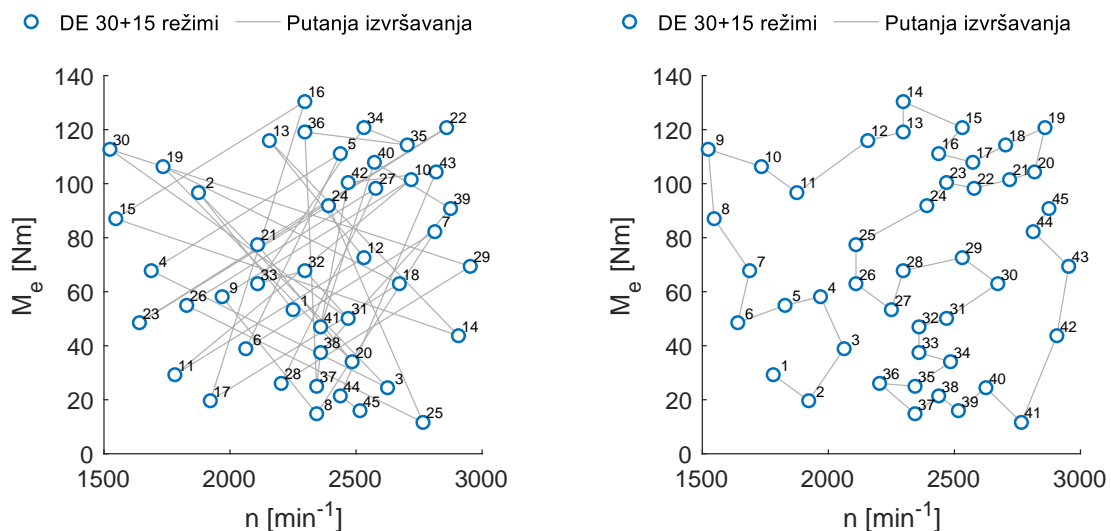


Slika 9.4.: Promene (mutacije) vektora putanje pri rešavanju PTP pomoću genetskog algoritma.

9.3. Optimalan redosled na osnovu rezultata ispitivanja sa SDN

U prethodnim poglavljima su prikazani različiti načini formiranja plana ispitivanja, počevši od klasičnih metoda DE, pa sve do preporuka za lokalno povećanje

zastupljenosti radnih režima unutar globalnog radnog polja motora SUS. Za primer pozicije 45 radnih režima iz poglavlja 8.3, na slici 9.5a prikazan je redosled izvršavanja prema izvornom nizu radnih režima. Uočava se analogija sa nasumičnim odabirom redosleda, odnosno ne može da se ustanovi bilo kakvo pravilo na osnovu koga je formiran dati redosled. Ukoliko se za isti set tačaka postavi uslov minimizacije ukupne Euklidove udaljenosti između tačaka i odredi približno optimalno rešenje primenom GA, dobiće se rezultati prikazani na slici 9.5b. Preduslov za formiranje kriterijumske funkcije je određivanje unakrsnih udaljenja (matrice distanci) za normalizovane granice radnog polja, kako bi udaljenja po broju obrtaja i po opterećenju motora bila na istom apsolutnom nivou.



(a) Inicijalni redosled izvršavanja radnih režima. (b) Najkraća putanja izvršavanja radnih režima u n/M_e prstoru.

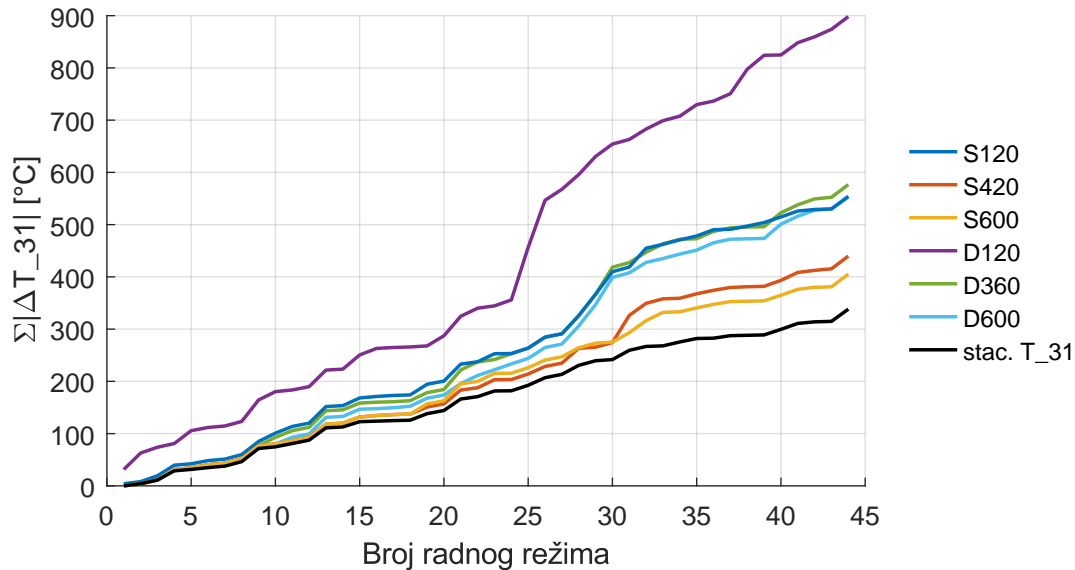
Slika 9.5.: Različiti redosledi izvršavanja radnih režima pri stacionarnom ispitivanju motora.

Određivanje najkraće putanje na domenu n/M_e opravdano je pri podešavanju radnih režima u smislu što manjih odklona upravljačkih parametara, ali sa aspekta neophodnog vremena stabilizacije, nije moguće odrediti šta je bliže, promena po broju obrtaja ili promena po opterećenju motora. Da bi se indentifikovao uticaj redosleda izvršavanja, potrebna je povratna informacija o radu sistema. U tom smislu, aproksimativni modeli temperature izduvnih gasova T_{31} za stacionarna i ispitivanja sa SDN će biti razmatrani u nastavku. Kriterijumska funkcija, odnosno matrica unakrsnih udaljenja, može da se formira na osnovu vrednosti apsolutnog odklona temperature izduvnih gasova između režima datog plana ispitivanja prema:

$$\mathbf{M}_{D(T_{31})}(i, j) = |\hat{y}_{T_{31}}(DE(i)) - \hat{y}_{T_{31}}(DE(j))|, \quad i, j = [1, n] \quad (9.10)$$

gde su sa DE obeleženi radni režimi sadržani u planu ispitivanja, a \hat{y} predstavlja pojedine matematičke modele formirane nad različitim grupama podataka. S obzirom na to da GA uspešno pronalazi (skoro) optimalne redoslede izvršavanja za datu \mathbf{M}_D , potrebno je izvršiti poređenja rezultata dobijenih na osnovu aproksimacija metodom SDN i idealnog slučaja redosleda izvršavanja za stacionarne rezultate ispitivanja. U tom smislu, na slici 9.6 su prikazani kumulativni otkloni formirani na osnovu optimalnih redosleda izvršavanja i različitih modela $\hat{y}_{T_{31}}$ prema:

$$\Sigma |\Delta T_{31}| = \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{M}_{D(T_{31})}(i, i+1) \quad (9.11)$$



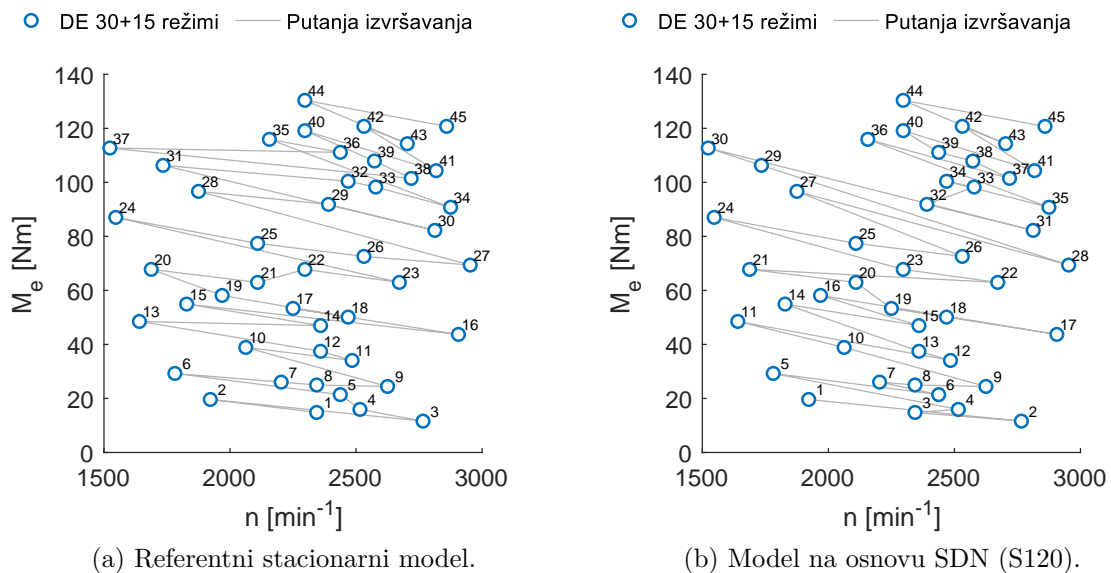
Slika 9.6.: Kumulativni otklon temperature izduvnih gasova T_{31} za optimalne redoslede izvršavanja formirane na osnovu različitih modela stacionarne aproksimacije.

U najgorem slučaju, kada bi redosled izvršavanja bio nasumičan (slika 9.5a) srednji otklon temperature izduvnih gasova po radnom režimu iznosi oko 140 °C. Ukoliko se odredi optimizovani redosled izvršavanja na osnovu kriterijuma minimalne udaljenosti u n/M_e prostoru (slika 9.5b), srednji otklon temperature T_{31} bi iznosio 34 °C.

U idealnom slučaju, za poznate rezultate stacionarnog ispitivanja, srednja vrednost otklona temperature izduvnih gasova iznosi 7.7 °C po radnom režimu. Ukoliko

bi se za određivanje optimalnog redosleda iskoristili modeli dobijeni ispitivanjem sa SDN, srednje vrednosti otklona po radnom režimu bi se kretale u granicama od $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ u zavosnosti od tipa i trajanja eksperimenta sa SDN, što je veoma blizu idealnog slučaja.

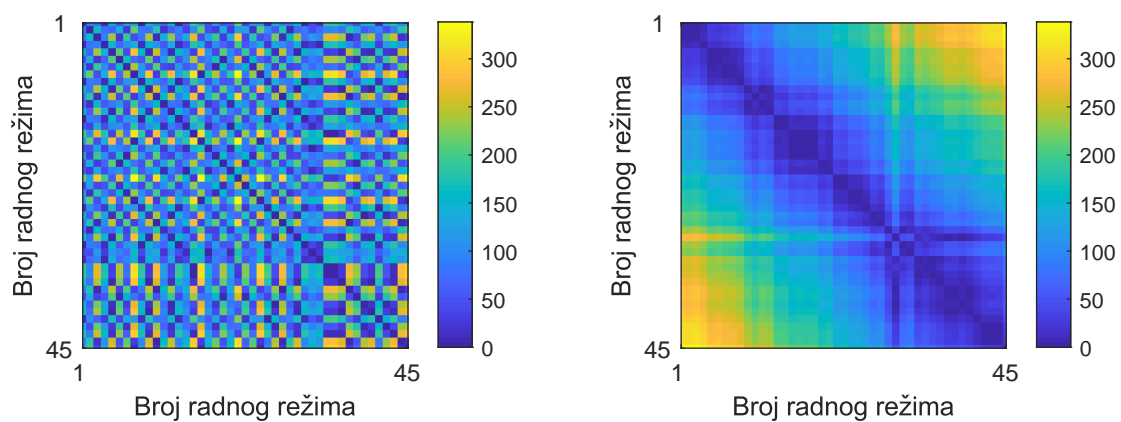
Na slici 9.7 je prikazan redosled dobijen na osnovu minimizacije ukupne udaljenosti tačaka u smislu apsolutnih otkolana temperature T_{31} . Prikazani su približno optimalni redosledi izvršavanja za M_D formiranu na osnovu aproksimativnog referentnog stacionarnog modela i stacionarne aproksimacije temperature izduvnih gasova određene dinamičkim testom S120. S obzirom da je načelni trend promene temperature izduvnih gasova veoma sličan kod oba modela (slika 7.3a), i rezultati primene GA u smislu redosleda izvršavanja su veoma slični.



Slika 9.7.: Redosled izvršavanja radnih režima stacionarnog ispitivanja određen genetskim algoritmom za različite modele temperature izduvnih gasova (T_{31}).

Inicijalna matrica međusobnih distanci tačaka plana ispitivanja (DE 30+15) u smislu temperaturnog otklona T_{31} , za model formiran na osnovu rezultata dinamičkog testa S120, data je na slici 9.8a. Nakon određivanja približno optimalne putanje po kriterijumu minimizacije otklona temperature izduvnih gasova, dobija se matrica unakrsnih distanci prikazana na slici 9.8b. Ukoliko je redosled izvršavanja optimalan, ovaj dijagram bi trebao da ukazuje monotono rastuću (ili opadajuću) razliku u temperaturi izduvnih gasova prema redosledu izvršavanja radnih režima. S

obzirom da GA ne može da obezbedi apsolutno tačan redosled izvršavanja radnih režima, na osnovu minimizacije kriterijumske funkcije, primećuje se blaga nepravilnost u centralnom delu dijagrama 9.8b. Kada se uzme u razmatranje načelan tok razlike temperatura prikazan na ovom dijagramu i brzina izvršavanja GA, od svega 6 sekundi, ovakvi rezultati su više nego zadovoljavajući. Za redosled izvršavanja prikazan na slici 7.3a, srednji otklon temperature izduvnih gasova po radnom režimu, pri stacionarnom ispitivanju motora bi iznosio oko 12.5 °C.

(a) Početne vrednosti M_D .(b) Krajnje vrednosti M_D .

Slika 9.8.: Međusobna razlika temperature T_{31} (matrica distanci) na režimima DE 30+15 prema S120 modelu za nasumični i skoro optimalni redosled izvršavanja prema.

10. Zaključak i smernice za budući rad

Povećanje efikasnosti i performansi sa aspekta razvijene snage i smanjenja ukupnih negativnih uticaja po životnu sredinu, predstavljaju osnovne ciljeve pri razvoju pogonskih sistema. Ukupna masa, tehnološkičnost izrade, cena, aspekti održavanja i vozivosti pogonskog sistema, samo su neki od kriterijuma koji dodatno usložnjavaju optimizaciju po već suprotstavljenim kriterijumima. Da bi novoprojektovani motor SUS ispunio navedene zahteve, neophodna je primena velikog broja varijabilnih sistema, a svaki od njih, na svoj način, povećava broj stepeni slobode sistema upravljanja i komplikuje postupak optimizacije.

Modelski zasnovana kalibracija upravljačkih parametara jeste metoda koja može da uspostavi vezu između posmatranih izlaznih veličina radnog procesa u funkciji velikog broja upravljačkih veličina posredstvom odgovarajućih empirijskih i statističkih aproksimativnih modela. Kako bi takvi modeli mogli da se formiraju i provere, neophodni su rezultati laboratorijskih ispitivanja motora, a s obzirom na visoku dimenzionalnost upravljanja, veoma je važno formiranje plana ispitivanja koji će obezbediti najpovoljnije podatke za određivanje nepoznatih parametara aproksimativnog modela.

Pri formiranju plana ispitivanja koriste se predznanja o ispitivanom objektu. Tako na primer, potrebno je određeno predznanje kako bi se definisale granice sistema u smislu dozvoljenih kombinacija upravljačkih parametara, ili predznanja neophodna za odabir odgovarajuće arhitekture matematičkih modela koji će se koristiti pri formiranju navedenih aproksimacija. S obzirom na to da je predmet analize multidimenzioni nelinearni objekat, obim predznanja je relativno ograničena i potrebne su efikasne metode za njegovo sticanje.

Veoma efikasan način za prikupljanje informacija o ispitivanom objektu, u ovom slučaju motoru, je upotreba dinamičkog ispitivanja. Prilikom dinamičkog ispitivanja se ne gubi vreme neophodno za dostizanje stacionarnog radnog režima, ali je

neophodno definisati odgovarajući dinamički plan ispitivanja i razviti metodu za interpretaciju rezulta takvog testa. U ovom radu, predstavljena je metoda dinamičkog ispitivanja motora SUS tokom koje se relativno sporo menja jedan upravljački parametar - metoda SDN. Realizovana su dva načina pripreme sistema za dinamički test, tj. sprovedeni su eksperimenti sa stacionarnom pripremom i dinamičkom pripremom, tj. uvođenjem sistema u ponovljive oscilacije. Takođe, variran je nagib nagibne funkcije, odnosno varirano je ukupno trajanje dinamičkog testa. Relativno kratkotrajnim dinamičkim ispitivanjem sa SDN, formirane su stacionarne aproksimacije karakterističnih predstavnika merenih efektivnih veličina (temperature, pritisci, potrošnja goriva) na osnovu korigovanih vrednosti srednje linije ovojnice dinamičkih odziva. Time su dobijene univerzalne karakteristike merenih veličina kao funkcije globalnih upravljačkih veličina, odnosno broja obrtaja i opterećenja motora.

Iako postoje određena odstupanja stacionarnih aproksimacija sa SDN u poređenju sa stacionarnom karakteristikom posmatrane veličine, pokazano je da rezultati dinamičkog ispitivanja mogu da se iskoriste za određivanje oblasti radnog polja motora SUS unutar kojih bi bilo poželjno povećati gustinu tačaka stacionarnog plana ispitivanja, a sve u cilju formiranja preciznije aproksimacije. Inspiracija za ovakvu analizu pronađena je prilikom razmatranja pozicija podmodela globalnih stacionarnih aproksimacija i njihovog poklapanja sa rezultatima analize gradijenata date aproksimacije. Nažalost, ne postoji jednoznačno pravilo za pozicioniranje radnih režima unutar globalnog radnog prostora, čijim će se ispitivanjem dobiti podaci za fomiranje kvalitetnih modela svih merenih veličina. Pored toga, zaključci izvedeni na osnovu analize rezultata dobijenih metodom SDN ukazuju da se oblasti za dodavanje tačaka mogu pouzdano formirati samo za veličine koje karakteriše relativno brz dinamički odziv.

Temperatura izduvnih gasova motora SUS spada u kategoriju veličina koje karakteriše duže vreme stabilizacije, tako da rezultati dobijeni metodom SDN ne mogu da ukažu na oblasti za dodavanje tačaka. Iako je to slučaj, predznanje o približnoj univerzalnoj karakteristici temperature izduvnih gasova, stečeno na osnovu ispitivanja sa SDN, može da se iskoristi za formiranje probližno optimalnog redosleda izvršavanja radnih režima, a sa ciljem dobijanja što kraćeg vremena stabilizacije između tačaka datog plana ispitivanja. Navedena analiza je sprovedena postavljanjem problema „trgovačkog putnika otvorene putanje” i formiranjem odgovarajućeg genetskog algoritma za njegovo rešavanje.

Na osnovu prikazanih rezultata i analiza, u nastavku će biti dat primer koji ukazuje na potencijalnu uštedu vremena tokom izvođenja stacionarnog plana ispitivanja.

Uzmimo da je za potrebe određivanja osnovne univerzalne mape specifične efektivne potrošnje goriva moguće odrediti 80 radnih režima prema faktorijalnom planu ispitivanja. Neka je neophodno prosečno vreme stabilizacije procenjeno na optimističnih 4 minuta za predmetni motor. Iz navedenog sledi da je za ispitivanje potrebno izdvojiti oko 5:20 h. Ako se primeni preliminarno dinamičko ispitivanje metodom sa SDN, za najkraće vreme rampe od ukupno 2 min (S120) na 4 brzinska režima sa dodatna 3 minuta stabilizacije između svakog testa sa SDN, na ovaj deo ispitivanja će biti izdvojeno ukupno $(2 \text{ min} + 3 \text{ min}) \cdot 4 = 20 \text{ min}$. Neka osnovni plan ispitivanja bude određen sa 30 radnih režima prema Sobolovoj sekvenci uz dodatnih 15 režima unutar karakterističnih oblasti za dodavanje tačaka traženog motorskog parametra, što bi po kvalitetu aproksimacije trebalo da se poklapa sa modelom formiranim nad prethodno izabranih 80 radnih režima. Takođe, na osnovu rezultata ispitivanja sa SDN, moguće je formirati približno optimalan redosled izvršavanja eksperimenta, tako da vreme stabilizacije između režima bude oko 2 min. U tom slučaju na prethodno vreme rezervisano za test sa SDN treba dodati $45 \cdot 2 \text{ min}$ što ukupno iznosi nepuna 2 h. Ukoliko se odabere duži test sa SDN i dodatni brzinski režim, ukupno vreme ispitivanja će se neznatno povećati, a to vreme je značajno kraće od početnih 5:20 h.

Iako su rezultati pozitivni i ukazuju na značajan potencijal metode sa SDN kao načina za sticanje predznanja o ispitivanom motoru, savetuje se pažljiv odabir vremena rampi dinamičkog testa kao i adekvatan odabir načina pripreme sistema. Razlozi su krajnje objektivni, a ogledaju se u velikoj raznolikosti motora SUS, različitim eksperimentalnim instalacijama za ispitivanje, raznovrsnoj mernoj opremi i pratećoj instrumentaciji, softveru i platformi koja se koristi pri sprovođenju eksperimenta i načinu obrade rezultata ispitivanja.

Osnovni nedostatak metode sa SDN, kao i drugih vidova dinamičkog ispitivanja, ogleda se u njihovom trajanju. Naime, da bi se obavio jedan test sa SDN, na primer test oznake S600 pri broju obrtaja od 3000 min^{-1} , potrebno je oko 10 minuta kontinualnog snimanja podataka. S tim u vezi, treba imati na umu mogućnosti i ograničenja opreme koja se koristi za indiciranje motora, posebno u pogledu raspoložive memorije i brzine prenosa podataka. Drugi negativan aspekt ogleda se u ponavljanju relativno dugačkih sekvenci ispitivanja ukoliko dođe do bilo kog problema na instalaciji, za razliku od stacionarnog ispitivanja gde ponavljanje radnog režima ne predstavlja problem. Iako je za potrebe ovog istraživanja snimljena više nego dovoljna količina podataka, treba napomenuti da su svi rezultati ispitivanja sa SDN formirani na osnovu samo jedne serije rezultata. Drugim rečima, ponavlja-

njem ispitivanja sa SDN bi se povećala statistička težina dinamičkih rezultata i svih izvedenih zaključaka uz otvaranje mogućnosti za proveru ponovljivost dinamičkog eksperimenta na razvijenoj laboratorijskoj instalaciji.

Buduće istraživanje na temu dinamičkog ispitivanja motora SUS bi trebalo razvijati u pravcu simultanog dinamičkog variranja većeg broja upravljačkih veličina. Promena opterećenja i broja obrtaja motora za metodu sa SDN ispitivanja omogućiće brže prikupljanje podataka na globalnom radnom polju. Takođe, ovakva konfiguracija ispitnog stola i ostalih pratećih sistema, omogućila bi izvršavanje bržih dinamičkih promena upravljačkih parametara, čime bi se otvorio prostor za istraživanje veoma aktuelnih tema, kao što su vozni ciklusi i dinamička identifikacija parametara rada motora SUS. Minimalni doprinosi na polju razvoja motora SUS i njihovih ekoloških karakteristika su značajni za svet u kome živimo. Ne treba zaboraviti da se procenjuje proizvodnja od oko dve do tri milijarde novih motora SUS do 2045. godine. Ovakve procene jasno ukazuju na to da će motor SUS i dalje biti dominantan izvor snage kada su u pitanju pogonski sistemi. Upravo prolazimo kroz period intenzivnih istraživanja na polju razvoja motora SUS i opravdano je očekivati potrebe za još intenzivnijim eksperimentalnim radom kako bi se došlo do motora budućnosti.

A. Dodatak

U nastavku su prikazane sledeće tabele:

- A.1 Oznake i opis OBD2 kanala;
- A.2 Opis komponenti akvizicione platforme NI PXI korišćene za uzorkovanje u vremenskom domenu;
- A.3 Nazivi i osnovne karakteristike senzora korišćenih za uzorkovanje podataka u vremenskom domnu;
- A.4 Pozicije na šemi laboratorijske instalacije, prikazane na slici 5.1;
- A.5 Osnovne tehničke karakteristike opacimetra AVL 439;
- A.6 Osnovne tehničke karakteristike inkrementalnog enkodera AVL 3064Z01 korišćenog za indiciranje motora;
- A.7 Osnovne tehničke karakteristike akvizicione platforme za indiciranje motora;
- A.8 Karakteristike piezoelektričnih senzora korišćenih za indiciranje motora;
- A.9 Osnovne karakteristike pojačivača punjenja korišćenih za kondicioniranje signala piezoelektričnih senzora za indiciranje motora;
- A.10 Konfiguracija računara korišćenog pri formiranju matematičkih aproksimativnih modela.

Naziv promenljive	Merna jedinica	Opis promenljive
ACC	%	Željeni nivo opterećenja motora
AMM	mg/cikl	Ciklusna masa usisnog vazduha
BAT	V	Napon akumulatorske baterije
COOLANT	°C	Temperatura rashladne tečnosti motora
EGR	%	Položaj EGR ventila
FUEL_P	bar	Pritisak goriva u rejlju (glavnoj magistrali za gorivo)
FUEL_T	°C	Temperatura goriva u povratnom vodu
INJ_A	mg/cikl	Ubrizgana ciklusna masa goriva
INJ_TIME	ms	Ukupno vreme ubrizgavanja preračunato na jedno ubrizgavanje po ciklusu
AIR_T	°C	Temperatura usisnog vazduha
MAIN_INJ_T	ms	Vreme otvorenosti brizgača tokom glavnog ubrizgavanja
SPEED	min ⁻¹	Broj obrtaja motora

Tabela A.1.: Spisak promenljivih koje su praćene posredstvom dijagnostičkog OBD II interfejsa.

Oznaka	Osnovne karakteristike
PXI-1042	Kućište sa osam polja za proširenje, visine 3U, sa univerzalnim napajanjem. Opseg temperatura rada 0°C do 55°C. [113]
PXI-8186	Mikrokontroler visokih performansi sa mogućnošću rada u realnom vremenu (RT), 2.2 GHz Intel Pentium 4 procesor, 1 GB RAM DDR memorije, 10/100BaseTX ethernet kontroler, 2x RS-232 serijski port, 1x GPIB port. Moguće izvršavanje LabVIEW aplikacija u realnom vremenu. [114]
PXI-4070	Digitalni multimetar sa $6\frac{1}{2}$ cifara i AD konverterom opsega do 300V. [185]
PXI-6123	16-bit, 500kS/s po kanalu, simultano uzorkovanje na 8 multifunkcionalnih kanala, 8 hardverski vremenski trigerovanih digitalnih ulaznih/izlaznih kanala, 2x 24-bit brojačka kanala, direktna memorija na kartici 16MB. [186]
PXI-6229	16-Bit, 250 kS/s, 32x analogni ulaz, 4x 16-bit analogni izlaz (833 kS/s) 48x digitalnih ulaza/izlaza, 32-bit brojač. [187]
PXI-6602	8-kanalni brojač/tajmer sa 8 digitalnih ulaznih/izlaznih kanala, 32-bit brojač/tajmer modul sa maksimalnom frekvencom takta od 80 MHz, 32x digitalna ulazno/izlazna kanala, simultani brzi pristup DMA (Direct Memory Access) memoriji, digitalni filteri za uklanjanje šuma. [188]
PXI-8461/2	2-kanalni, brzi PXI-CAN interfejs, kontroler Philips SJA 1000 CAN. [189]

Tabela A.2.: Komponente korišćene akvizicione platforme NI PXI.

Oznaka	Senzor	Oznaka senzora	Opseg
P_0_A	Piezorezistivni	Motorola MPX 4100	0.2÷1.05 bar
T_0_A	Termootporni	Heraeus Pt-100	-55÷500 °C
RH	Otporni	Honeywell HIH 4000	30÷90%
N	Halov efekat	Honeywell GT1	20÷7000 min ⁻¹
MD	Tenzometrijski	HBM T40B	±2000 Nm
GF	Gravimetrijski	FCMS 3000	do 120 kg/h
P_11	Piezorezistivni	IHTM TPR 2	0÷2 bar
T_11	Termootporni	Heraeus Pt-100	-55÷500 °C
P_21	Piezorezistivni	IHTM TPR 5	0÷5 bar
T_21	Termootporni	Heraeus Pt-100	-55÷500 °C
P_31	Piezorezistivni	IHTM TPR 5	0÷5 bar
T_31	Termopar	Omega Tip K	do 1200 °C
P_41	Piezorezistivni	IHTM TPR 2	0÷2 bar
T_41	Termopar	Omega Tip K	do 1200 °C
P_OIL	Piezorezistivni	IHTM TPR 10	0÷10 bar
T_OIL	Termootporni	Heraeus Pt-100	-55÷500 °C
OPAC_TP	Fotometrijski	AVL 439	0÷100%

Tabela A.3.: Opis i osnovne karakteristike korišćenih senzora na mernoj instalaciji.

Pozicija	Opis
1	Hladnjak za kondicioniranje rashladne tečnosti motora
2	Hladnjak za kondicioniranje sredstva za podmazivanje motora
3	Senzori temperature i pritiska sredstva za podmazivanje
4	Hladnjak za kondicioniranje temperature goriva
5	Sistem za merenje masenog protoka goriva
6	Pumpa za dopunjavanje sistema za merenje potrošnje goriva
7	Dnevni rezervoar goriva
8	Ventil za kontrolu recirkulacije izduvnih gasova - EGR
9	Elektronska upravljačka jedinica motora - EUJ
10	Usisni kolektor
11	Pumpa visokog pritiska za gorivo
12	Brizgači sa akumulatorom goriva - CR
13	Motor
14	Senzori za indiciranje pritiska u cilindru
15	Dinamička motorska kočnica
16	Senzor obrtnog momenta
17	Vratilo za vezu motora sa električnom kočnicom
18	Senzor broja obrtaja
19	Izduvni kolektor
20	Inkrementalni optički enkoder (senzor ugaonog položaja kolenastog vratila)
21	Prigušni lonac izduvnog sistema
22	Senzori relativnog pritiska i temperature u izduvnom kolektoru pre turbine
23	Sonda za uzorkovanje izduvnog gasa
24	Oksidacioni katalizator
25	Zaobilazni ventil turbine - WG
26	Senzori relativnog pritiska i temperature u izduvnom kolektoru posle turbine
27	Turbina
28	Kompresor
29	Hladnjak recirkulacionog izduvnog gasa
30	Senzori temperature i pritiska u usisnom kolektoru motora pre kompresora
31	Senzori temperature i pritiska u usisnom kolektoru motora posle kompresora
32	Senzor masenog protoka vazduha sa zagrejanim filmom (HFM)
33	Modul za merenje termodinamičkih parametara okoline (pritisak, temperatura, relativna vlažnost)
34	Prečistač usisnog vazduha motora

Tabela A.4.: Pozicije na šematskom prikazu laboratorijske instalacije za ispitivanje motora (slika 5.1).

Osnovne tehničke karakteristike opacimetra AVL 439	
Protok izduvnog gasa	delimičan protok
Dužina merne komore	430 mm
Dopremanje uzorka	Membranska pumpa sa konstantnim protokom pri različitim vrednostima absolutnog pritiska na mestu uzorkovanja
Dozvoljeni relativni pritisak na mestu uzorkovanja	-100 mbar do 400 mbar
Recirkulacija uzorka tokom merenja	da
Vremenski odziv	0.1 s
Preporučena upotreba uređaja	pri stacionarnim i dinamičkim ispitivanjima
Osetljivost	$N = 0.1\%$ ili $k = 0.0025 \text{ m}^{-1}$
Rezolucija merenja	$N = 0.01\%$ ili $k = 0.0025 \text{ m}^{-1}$
Stabilnost merenja	$N = 0.1\%$ ili $k = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ na 30 min
Dozvoljena maskimalna temperatura izduvnog gasa na mestu uzorkovanja	800°C
Temperatura kondicioniranja uzoraka	100°C
Zaštita merne komore od pregrevanja	da
Komunikacija	AK protokol RS232 interfejsa, analogni izlaz (50Hz osvežavanje)
Implementirani filteri	Basselov filter i pokretna sredina

Tabela A.5.: Osnovne tehničke karakteristike opacimetra AVL 439.

Osnovne karakteristike inkrementalnog enkodera	
Merenje fizičke veličine	Broj obrtaja
Tip senzora	Optički
Model	AVL 3064Z01
Kanal sa referentnom markom (TRIG.)	da, jedan impuls po krugu
Kanal sa podesivom rezolucijom (CDM.)	3600, 1800, 720, 360,... 36 impulsa po krugu
Maksimalni dozvoljeni broj obrtaja	20000 min ⁻¹
Temperaturski opseg primene	od -40°C do 120°C

Tabela A.6.: Tehničke karakteristike korišćenog enkodera.

Osnovne karakteristike modula za indiciranje motora			
Akvizionarna platforma	AVL Indimaster Compact 670		
Kontrolni modul	AVL Control Unit 6708		
Maksimalan broj kanala	120		
Povezivanje enkodera	TRIG. i CDM		
Komunikacija	Ethernet 100 Mbps		
Mogućnost proširenja kontrolnog modula	2x 8-kanalna <i>high-speed</i> akvizicija		
Akvizicioni modul	AVL Data Acquisition Unit 6706		
Mogućnost proširenja akvizicionog modula	4x 4-kanalna (ADC4+) ili 8-kanalna (ADC8+) analogna akvizicija i 1x brojačka kartica (UTC) za obradu digitalnih signala		
Kartice za proširenje	ADC4+	ADC8+	UTC
Rezolucija	14 Bit	12 Bit	-
Interna memorija	16 MB	16 MB	4 MB
Korisnički interfejs	IndiCom 1.6		

Tabela A.7.: Tehničke karakteristike akvizicione platforme za indiciranje motora.

Osnovne karakteristike senzora za indiciranje pritiska u cilindru motora				
Merenje fizičke veličine	Pritisak			
Tip senzora	Piezoelektrični			
Model	AVL GM12D			
Opseg merenja	200 bar			
Navoj za ugradnju	M5 x 0.5			
Pojačivač punjenja	AVL 3066A01			
Opseg pojačanja	200 pC/V			
Mesto ugradnje	Cyl. 1	Cyl. 2	Cyl. 3	Cyl. 4
Serijski broj	L293	L223	L294	I940
Osetljivost (<i>front</i>)	15.72 pC/bar	15.67 pC/bar	16.08 pC/bar	15.59 pC/bar
Osetljivost (<i>shoulder</i>)	16.06 pC/bar	16.08 pC/bar	16.58 pC/bar	16.33 pC/bar
Kalibrisana osetljivost	15.98 pC/bar	15.97 pC/bar	15.69 pC/bar	16.19 pC/bar
Kalibrisano pojačanje mernog lanca	12.5167 bar/V	12.52 bar/V	12.74 bar/V	12.35 bar/V
Odstupanje (<i>front</i>)	+1.64%	+1.9%	-2.39%	+0.69%
Odstupanje (<i>shoulder</i>)	-0.51%	-0.7%	-5.33.7%	-2.35%

Tabela A.8.: Senzori za indiciranje pritiska u cilindru motora.

Osnovne karakteristike pojačivača punjenja	
Model	AVL 3066 A01
Osetljivost	podesiva od 50 pC do 1600 pC
Greška linearnosti	< 0.01% FSO
Greška pojačanja	< ±0.5% za sva pojačanja
Temperaturna osetljivost	<250 ppm/°C
Filteri	podesiv niskopropusni filter 2 kHz / 4 kHz / 9 kHz / 10 kHz / 20 kHz / 40 kHz / 90 kHz / 200 kHz za sve osetljivosti
Model	AVL Micro IFEM 4P4G
Osetljivost	podesiva od 80 pC do 8000 pC za izlaz do 10 V (ofset 0 V) podesiva od 144 pC do 14400 pC za izlaz do 18 V (ofset -8 V)
Greška linearnosti	<0.01% FSO
Greška pojačanja	8 pC/V ... 25 pC/V: <0.5% 25 pC/V ... 800 pC/V: <0.3%
Temperaturna osetljivost	<40 ppm/°C
Rezolucija izlaznog signala	12-bit
Filteri	podesiva gornja <i>cut-off</i> frekvenca: 12 kHz / 20 kHz / 30 kHz / 50 kHz / 100 kHz donja <i>cut-off</i> frekvenca podesiva za kvazistacionarna merenja ili sa automatskom kontinualnom kompenzacijom klizanja

Tabela A.9.: Karakteristike pojačivača punjenja za piezoelektrične senzore pritiska.

Konfiguracija PC računara	
Procesor	AMD Ryzen 5 2600X
Broj fizičkih/logičkih jezgara	6/12
Radni takt procesora	3.6 GHz (max. 4.2 GHz)
Ukupana <i>cache</i> memorija	L1: 576KB, L2: 3MB, L3: 16MB
Matična ploča	MSI B450-A PRO
Socket	AM4
Memorijski modul	Kingston HX426C16FB2/8
Ukupno RAM memorije	8 GB

Tabela A.10.: Konfiguracija PC računara korišćenog za formiranje matematičkih modela.

Pregled korišćenih oznaka

Oznake

E	Matrica kovarjansi (očekivane sličnosti)
F_2	Galiosovo polje binarne osnove
M_D	Matrica unakrsnih udaljenja (kriterijumska funkcija)
U	Uniformna funkcija raspodele
W	Matrica težinskih koeficijenata dimenzije $S \times R$
X	Matrica regresionih koeficijenata linernog matematičkog modela, vektor x koordinata tačaka
X_C	Matrica regresionih koeficijenata linernog matematičkog modela za sve tačke kandidate optimalnog dizajna
Y	Vektor y koordinata tačaka
$\Delta y(\beta)$	Otklon odziva na nagibnu funkciju u odnosu na stacionarnu karakteristiku
\hat{y}	Izlazna veličina matematičkog modela
(l)	Linearni koeficijent
(nl)	Nelinearni koeficijent
\underline{a}	Izlazne vrednosti datog sloja ANN
$\underline{p}_q, \underline{t}_q$	Parovi podataka za obuku ANN
A_{eff}	Kriterijum optimalnosti <i>A-Optimal</i> dizajna
a_F, b_F	Broj tačaka faktorijalnog dizajna, Amplitude harmonika Furijoeve transformacije
A_k	Amplituda harmonika DFT
a_k	k -ti član razvoja sekvence
b	Otklon, <i>bias</i> , Osnova sekvence

C	Broj centralnih tačaka CCD
$c_{1,2,\dots}$	Koeficijenti polinoma
Cr	<i>Crest</i> faktor dinamičke sekvence
$d(i, j)$	Udaljenost između tačaja i i j
D_{eff}	Kriterijum optimalnosti <i>D-Optimal</i> dizajna
d_j	Red polinoma j -te dimenzije prostora Sobol sekvence
E	Ukupan broj elementarnih operacija algoritma
e	Greška
F	Broj tačaka faktorijskog dizajna, frekvencija harmonika Furijoeve transformacije
f_0	Vrednost frekvencije signala u trenutku t_0
F_{grad}	Korekcionni faktor odziva testa sa SDN
F_{uslov}	Funkcija uslova za dodavanje tačaka
$g(x)$	Aktivaciona funkcija
h	Dimenzija matrice
$h(t)$	Hevisajdova funkcija
I_k	Imaginarni deo kompleksnog koeficijenta DFT
K	Broj nezavisnih ulaznih veličina CCD, pojačanje sistema
k	Vremenski trenutak, ukupan broj elemenata regresione matrice \mathbf{X} , dimenzija matrice, član sekvence, frekvencija DFT, koeficijent apsorpcije svetlosti
$k(x_i, x_j \boldsymbol{\theta})$	Osnovna funkcija (<i>kernel</i>) GP
M	Ukupan broj osnovnih funkcija, red polinoma
M_e	Efektivni obrtni moment motora
N	Ukupan broj posmatranja, ukupan broj elemenata dinamičke sekvence, Gausova raspodela, ukupan broj kombinacija putanja

n	Broj obrtaja motora, poremećaj, merni šum, broj tačaka plana ispitivanja, broj gena (genetski algoritam)
$n(t)$	Nagibna funkcija
n_C	Ukupan broj elemenata regresione matrice matematičkog modela formiranog na osnovu svih tačaka kandidata optimalnog dizajna
P	Verovatnoća, vektor putanja (genetski algoritam)
p	Dimenzionalnost upravljanja, dimenzionalnost dizajna eksperimenta, broj ulaznih veličina
Q	Ukupan broj parova podataka za obuku ANN
q^{-1}	Vremensko kašnjenje, prethodna vrednost
R	Ukupan broj ulaza datog sloja ANN
r	Broj izlaznih veličina
R_k	Realni deo kompleksnog koeficijenta DFT
$R_{x_1x_1}$	Autokorelacioni vektor sekvence x_1
$R_{x_1x_2}$	Vektor unakrsne korelacije sekvenci x_1 i x_2
S	Ukupan broj perceptrona datog sloja ANN
s	Kompleksna promenljiva
T	Broj dodatih tačaka CCD, ukupno trajanje dinamičke sekvence
t	Vreme
T_1	Vremenska konstanta linearnog sistema prvog reda
t_{inj}	Vreme ubrizgavanja
$u_{1,2,\dots}$	Ulazna veličina, upravljačka veličina
V_{eff}	Kriterijum optimalnosti <i>V-Optimal</i> dizajna
$v_{j,r}$	Direkcionni brojevi Sobol Sekvence
w_{ij}	Težinski koeficijent
$X(F)$	Kompleksni koeficijenti Furijeove transformacije

x_j	Vrsta (red) regresione matrice
$x_{1,2,\dots}$	Dinamičke sekvence
X_a, X_b	Amplitude harmonika Furijeove transformacije
X_k	Kompleksni koeficijenti DFT
x_n	Dinamička sekvenca u diskretnom vremenskom domenu
y	Izlazna veličina fizičkog procesa
Oznake grčkim alfabetom	
α	Konstanta, pozitivna konstanta, brzina učenja ANN, slobodan član, udaljenje tačaka CCD
α_{pp}	Ugao pretpaljenja
β	Koeficijent nagiba (nagibne) finkcije, zakon promene frekvence
$\theta (\sigma_l, \sigma_f)$	Vektor parametrizacije osnovne funkcije Gausovog procesa
δ	Relativna razlika
μ	Srednja vrednost
ω	<i>van der Corput</i> sekvenca
σ, σ_f	Standardno odstupanje
$\sigma_{(uy)}$	Standardno odstupanje razlike normalizovane ulazne i izlazne veličine
σ_l	Karakteristična razdaljina koja određuje nepostojanje sličnosti
τ	Vremenska konstanta, vrednost inkrementalnog smicanja signala
$\theta_i^{(l)}, \theta_i^{(nl)}$	Linearni i nelinearni težinski koeficijent
θ_k	Faza harmonika DFT
$\underline{\Sigma}(\sigma)$	Mahalanobisova norma
$\varphi_b(i)$	Inverzna radikalna funkcija osnove b
Φ_i	Osnovna funkcija (<i>kernel</i>) RBF

Skraćenice

ANBS	A mplitudno modulisana n asumična b inarna sekvenca
ANN	A rtificial N eural N etwork
AORP	A utomatsko o dređivanje r elevantnosti p rediktora
APNBS	A mplitudno modulisana p seudo n asumična b inarna sekvenca
APRBS	A mplitude modulated P seudo R andom B inary S equence
ARBS	A mplitude modulated R andom B inary S equence
ARD	A utomatic R elevance D etermination
BEV	B attery E lectric V ehicle
CAN	C ontroller A rea N etwork
CCD	C entral C omposite D esign
CDF	C umulative D istribution F unction
CKP	C entralni k ompozitni p lan
CR	C ommon R ail
DAQ	D ata A cquisition
DE	D izajn eksperimenta
DFT	D iskretna F urijeova T ransformacija
DoE	D esign o f E xperiments
DP	D inamička P riprema
EGR	E xhaust G as R ecirculation
EMST	E uclidean M inimum S panning T ree
EUJ	E lektronska U pravljačka J edinica
FCMS	F uel C onsumption M easurement S ystem
FF	F ull F actorial
FRO	F unkcije r adijalne o snove

FSO	F ull S cale O utput
HCCI	H omogeneous C harge C ompression I gnition
HFM	H ot F ilm M ass flow meter
KV	K olenasto v ratilo
LHS	L atin H ypercube S ampling
LMS	L east M ean S quare
LOLIMOT	L ocal L inear M odel T rees
MBC	M odel B ased C alibration
MLP	M ultiple L ayers of P erceptrons
MNK	M etoda n ajmanjih k vadrata
MZK	M odelski z asnovana k alibracija
NARX	N onlinear A utoregressive models with e xogenous I nputs
NBS	N asumične b inarne s ekvence
NDEC	N ew E uropean D riving C ycle
NI	N ational I nstruments
OBD	O n-board D iagnostics
OFAT	O ne- F actor- A t-a- T ime
PCCI	P remixed C harge C ompression I gnition
PCI	P eripheral C omponent I nterconnect
PCI	P rechamber I njection
PEMS	P ortable E mission M easurement S ystem
PNBS	P seudo n asumične b inarne s ekvence
PRBS	P seudo R andom B inary S equence
PRESS	P redicted R esidual E rror S um of S quares
PTP	P roblem t rgovačkog p utnika

PXI	P CI extensions for I nstrumentation
RBF	R adial B asis F unction
RBS	R andom B inary S equence
RDE	R eal D riving E missions
RMS	R oot M ean S quare
ROLS	R ecursive O rthogonal L east S quares
RTP	R eal T ime P rocessing
SCR	S elective C atalytic R eduction
SDN	S por d inamički n agib
SDS	S low D ynamic S lope
SMT	S poljna M rtva T ačka
SOI	S tart O f I njection
SP	S tacionarna P riprema
SUS	S a u nutrašnjim s agorevanjem
TDL	T apped D elay L ine
TJI	T urbulent J et I gnition
TSP	T ravelling S alesman P roblem
VCI	V ehicle C ommunication I nterface
VNM	V eštačka n euronska m reža
VSNM	V išeslojna n euronska m reža
WG	W astegate
XOR	E kskluzivno <i>ili</i>
ZEV	Z ero E lectric V ehicle

Bibliografija

- [1] CARB, “History | California Air Resources Board.” [Online]. Available: <https://ww2.arb.ca.gov/about/history>
- [2] M. Tomić and S. Petrović, *Motori sa unutrašnjim sagorevanjem*, 3rd ed. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2004.
- [3] Vicente Franco, Francisco Posada Sánchez, John German, and Peter Mock, “Real-world Exhaust Emissions from Modern Diesel Cars,” The International Council on Clean Transportation, Tech. Rep., Oct. 2014. [Online]. Available: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PEMS-study_diesel-cars_20141013.pdf
- [4] Gregory J. Thompson, “In-Use Emissions Testing of Light-Duty Diesel Vehicles in the United States,” Center for Alternative Fuels, Engines & Emissions West Virginia University, West Virginia, USA, Tech. Rep., May 2014. [Online]. Available: https://www.eenews.net/assets/2015/09/21/document_cw_02.pdf
- [5] Andreas Cremer and Ilona Wissenbach, “German automakers will stop developing combustion engines in six years, Continental says,” Aug. 2017. [Online]. Available: <https://europe.autonews.com/article/20170803/ANE/170809854>
- [6] Mary Beth O’Leary, “3Q: John Heywood on the future of the internal combustion engine | MIT News,” Apr. 2018. [Online]. Available: <http://news.mit.edu/2018/3q-mit-john-heywood-future-of-internal-combustion-engine-0418>
- [7] A. Wiartalla, “FEV study examines drivetrain topologies in 2030 - FEV,” FEV Group GmbH, Aachen, Germany, Tech. Rep., Jul. 2017. [Online]. Available: <http://magazine.fev.com/en/fev-study-examines-drivetrain-topologies-in-2030-2/>

- [8] Grand View Research, “Internal Combustion Engine (ICE) Market Size, Share & Trends Analysis Report By Fuel (Petroleum, Natural Gas), By End Use (Automotive, Aircraft, Marine), By Region, And Segment Forecasts, 2018 - 2025,” Dec. 2018. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/internal-combustion-engine-market>
- [9] Kumi Naidoo, “Amnesty challenges industry leaders to clean up their batteries,” Mar. 2019. [Online]. Available: <https://www.amnesty.org/en/latest/news/2019/03/amnesty-challenges-industry-leaders-to-clean-up-their-batteries/>
- [10] A. Widuto, “EU support for coal regions,” European Parliament - EPRS European Parliamentary Research Service, Briefing PE 642.217, 2019. [Online]. Available: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/642217/EPRS_BRI\(2019\)642217_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/642217/EPRS_BRI(2019)642217_EN.pdf)
- [11] European Commission, “Reducing CO2 emissions from passenger cars,” Nov. 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en
- [12] Christoph Buchal, Hans-Dieter Karl, and Hans-Werner Sinn, “Kohleomotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO2-Bilanz?” *ifo Institut*, vol. 72, no. 8, pp. 40–54, Apr. 2019. [Online]. Available: https://www.cesifo-group.de/ifoHome/publications/docbase/DocBase_Content/ZS/ZS-ifo_Schnelldienst/zs-sd-2019/zs-sd-2019-08/11012019008003.html
- [13] Mia Romare and Lisbeth Dahllöf, “The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles,” IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden, Tech. Rep. C 243, May 2017.
- [14] R. Isermann, *Engine Modeling and Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39934-3>
- [15] B. Berger, “Modeling and Optimization for Stationary Base Engine Calibration,” Ph.D. dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, 2012. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1108936/1108936.pdf>

- [16] N. Tietze, “Model-based Calibration of Engine Control Units Using Gaussian Process Regression,” Ph.D. Thesis, Technische Universität, Darmstadt, Feb. 2015. [Online]. Available: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4572/>
- [17] J. Godburn, D. Brown, and R. Case, “Computer-controlled non-steady-state engine testing,” *International Journal of Vehicle Design*, vol. 12, no. 1, pp. 50 – 60, 1991.
- [18] M. C. Ward, C. J. Brace, N. D. Vaughan, R. Ceen, T. Hale, and G. Kennedy, “Investigation of ‘Sweep’ Mapping Approach on Engine Testbed,” in *SAE 2002 World Congress & Exhibition*, Mar. 2002. [Online]. Available: <http://papers.sae.org/2002-01-0615/>
- [19] N. Keuth, M. Thomas, H. Pflügl, E. Martini, and S. Bergold, “Utilization of the Slow Dynamic Slope Methodology for the Calibration of the ECU-Functions "Air Charge Determination"and "Torque Prediction" in the Series Production,” in *Design of Experiments (DoE) in Engine Development: modern development methods to meet new challenges*, K. Röpke, Ed., vol. 1. Berlin, Germany: expert-Verlag, 2009, pp. 122–136. [Online]. Available: <http://d-nb.info/992518733>
- [20] Leithgöb R., M. Bollig, Büchel M., and Henzinger F., “Methodology for efficient calibration of model based ECU structures.” Wiesbaden: AVL Deutschland GmbH, 2005, pp. 195–210.
- [21] Murakami Y., Kusuki H., Nakagawa T., Yamamoto H., Leithgob R., Rainer A., and Martini E., “Slow Dynamic Slopes (SDS) Methodology Applied for a Stratified Gasoline Engine,” in *Design of Experiments in Engine Development III*, K. Röpke, Ed. Renningen, Germany: expert-Verlag, 2007, pp. 413–423. [Online]. Available: <http://d-nb.info/984171886>
- [22] G. Mancini, “Automotive Diesel Engine Transient Operation: Modeling, Optimization and Control,” Ph.D. Thesis, Università di Bologna, Bologna, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/262719534_Automotive_Diesel_Engine_Transient_Operation_Modeling_Optimization_and_Control
- [23] K. Shimojo, Y. Kitamura, M. Sato, and S. Adachi, “Soot Modeling Using Quasi-Stationary Measurement for Gasoline Engine,” *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, vol. 47, no. 3, pp. 665–671,

2016. [Online]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaeronbun/47/3/47_20164328/_article/-char/en
- [24] N. Miljić, S. Popović, M. Kitanović, P. Mrđa, S. Đinić, and V. Petrović, “Benchmarking of an existing engine in an automated way,” AVL, Graz, Austria, Tech. Rep. ICED 1510/C01 SDS, Nov. 2015.
- [25] N. Miljić, S. Popović, P. Mrđa, and M. Kitanović, “Slow Dynamic Slope method in IC engine benchmarking,” *Thermal Science, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade*, vol. 22, no. 3, pp. 1271 – 1283, 2018. [Online]. Available: <http://thermalscience.vinca.rs/online-first/2620>
- [26] P. Mrđa, N. Miljić, S. Popović, and M. Kitanović, “Continuous slow dynamic slope approach for stationary base internal combustion engine mapping,” *Thermal Science, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade*, vol. 24, no. 1, pp. 147–158, 2020. [Online]. Available: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361900171M#.XPLjf4gzbGg>
- [27] K. Mollenhauer and H. Tschöke, Eds., *Handbook of Diesel Engines*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783540890829>
- [28] Jörn Kahrstedt, Hermann-Josef Engler, Richard Dorenkamp, and Stefanie Jauns-Seyfried, “Der Modulare Dieselmotoren-Baukasten von Volkswagen | SpringerLink,” *MTZ worldwide*, vol. 73, no. 12, pp. 954–693, Nov. 2012. [Online]. Available: <https://ezproxy.nb.rs:2078/article/10.1007/s35146-012-0525-9>
- [29] ETAS GmbH, “ETAS SCODE-ANALYZER 2.6 Getting Started,” 2019. [Online]. Available: <https://www.etas.com/en/products/scode.php>
- [30] M. Deflorian, “Versuchsplanung und Methoden zur Identifikation zeitkontinuierlicher Zustandsraummodelle am Beispiel des Verbrennungsmotors,” Ph.D. Thesis, Technical University of Munich, 2011. [Online]. Available: [http://opac.ub.tum.de/InfoGuideClient.tumsis/start.do?Login=wotum07&Query=10="BV040710664"](http://opac.ub.tum.de/InfoGuideClient.tumsis/start.do?Login=wotum07&Query=10=)
- [31] H. Niedernolte, F. Klopper, A. Mitterer, and F. Schwarzer, “Workflow for data evaluation during basic calibration of combustion engines.” Munich, Germany: IEEE, 2006. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4776957>

- [32] The MathWorks, Inc., “Model-Based Calibration Toolbox - MBC Getting Started Guide,” 2016. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/mbc.html>
- [33] ETAS GmbH, “ETAS ASCMO,” 2019. [Online]. Available: <https://www.etas.com/en/products/ascmo.php>
- [34] AVL List GmbH, “AVL CAMEO 4,” 2018. [Online]. Available: <https://www.avl.com/-/avl-cameo-4>
- [35] FEV Europe GmbH, “TOPEXPART FEVcal | Model-based Calibration | FEV - FEV Group,” 2019. [Online]. Available: <https://www.fev.com/en/what-we-do/software-and-testing-solutions/products/testing/calibration/topexpert-xcal.html>
- [36] K. Röpke and C. von Essen, “DoE in engine development,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 24, no. 6, pp. 643–651, Oct. 2008. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/qre.941>
- [37] R. A. Fisher, *The Design of Experiments*, 9th ed. University of Adelaide, Australia: Hafner Press, New York, USA, 1971. [Online]. Available: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.502684/page/n9>
- [38] ETAS GmbH, “Model-based Calibration,” 2019. [Online]. Available: https://www.etas.com/en/applications/applications_model-based_calibration.php
- [39] Peter J. Maloney, “Objective Determination of Minimum Engine Mapping Requirements for Optimal SI DIVCP Engine Calibration.” US: SAE International, 2009. [Online]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2009-01-0246/>
- [40] Joshua P. Styron, “Using Model-Based Calibration Toolbox Multimodels for Cycle-Optimized Diesel Calibration,” 2008, ford Motor Company. [Online]. Available: https://ww2.mathworks.cn/content/dam/mathworks/tag-team/Objects/m/72792_06_ford_mbc_for_diesel_calibration_paper.pdf
- [41] Peter J. Maloney, “Generating Optimal Engine Calibrations and Real-Time Engine Models using Model-Based Calibration Toolbox - Webinar,” Novi, Michigan, USA, 2012. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/videos.html>

- [42] Michael Defflorian, Florian Klöpfer, and Joachim Rückert, “Online Dynamic Black Box Modelling and Adaptive Experiment Design in Combustion Engine Calibration,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 7, pp. 703–708, 2010. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015369123#!>
- [43] O. Nelles, *Nonlinear System Identification, From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04323-3>
- [44] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale, and O. D. Jesús, *Neural Network Design*, 2nd ed. Wrocław: Martin Hagan, 2014. [Online]. Available: <http://hagan.okstate.edu/nnd.html>
- [45] P. C. Hansen, V. Pereyra, and G. Scherer, *Least Squares Data Fitting with Applications*. Johns Hopkins University Press, 2012. [Online]. Available: <https://muse.jhu.edu/book/21076>
- [46] N. R. Draper and H. Smith, *Applied Regression Analysis*, 3rd ed. Canada: Wiley, 1998. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Applied+Regression+Analysis%2C+3rd+Edition-p-9780471170822>
- [47] R. R. Hocking, “A Biometrics Invited Paper. The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression on JSTOR,” *International Biometric Society*, vol. 32, no. 1, pp. 1–49, 1976. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/2529336>
- [48] C. d. Boor, *A Practical Guide to Splines | Carl de Boor | Springer*, ser. Applied Mathematical Sciences. Springer - Verlag New York, 1978, vol. 27. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9780387953663>
- [49] C. H. Reinsch, “Smoothing by spline functions,” *Numerische Mathematik*, vol. 10, pp. pages177–183, 1967. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02162161>
- [50] The MathWorks, Inc., “Model-Based Calibration Toolbox - Model Browser User’s Guide,” 2016. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/mbc.html>

- [51] M. H. Hayes, *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. New York, United States: John Wiley & Sons, inc., 1996. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-rs/Statistical+Digital+Signal+Processing+and+Modeling-p-9780471594314>
- [52] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors," *Nature*, vol. 323, pp. 533–536, 1986. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/323533a0>
- [53] R. Rojas, *Neural Networks - A Systematic Introduction*, 1st ed. Springer-Verlag, Berlin: MIT Press, 1996. [Online]. Available: <http://page.mi.fu-berlin.de/rojas/neural/index.html.html>
- [54] P. C. Mahalanobis, "On test and measures of group divergence: theoretical formulae," *Journal and Proceedings of Asiatic Society of Bengal*, vol. 26, no. 4, pp. 541–588, 1930. [Online]. Available: <http://library.isical.ac.in:8080/xmlui/handle/10263/1639>
- [55] Andrew Ng, "Stanford Machine Learning," 2011. [Online]. Available: <http://www.holehouse.org/mlclass/index.html>
- [56] H. Wendland, "Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree," *Advances in Computational Mathematics*, vol. 4, pp. 389–396, 1995. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2F02123482>
- [57] H. Rocha, "On the selection of the most adequate radial basis function," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 33, no. 3, pp. 1573–1583, 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000590>
- [58] D. S. Broomhead and D. Lowe, "Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks," *Complex Systems Publications*, vol. 2, no. 3, pp. 321–355, 1988. [Online]. Available: https://www.complex-systems.com/abstracts/v02_i03_a05/
- [59] D. Yu, J. Gomm, and D. Williams, "A Recursive Orthogonal Least Squares Algorithm for Training RBF Networks," *Neural Processing Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 167–176, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1023/A:1009622226531>

- [60] J. Gomm and D. Yu, "Selecting radial basis function network centers with recursive orthogonal least squares training," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 306–314, Mar. 2000.
- [61] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, *Gaussian processes for machine learning*, ser. Adaptive computation and machine learning. Cambridge, Mass: MIT Press, 2006, oCLC: ocm61285753. [Online]. Available: <http://www.gaussianprocess.org/gpml/chapters/RW.pdf>
- [62] The MathWorks, Inc., "Kernel (Covariance) Function Options - Matlab Help Center," 2020. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/stats/kernel-covariance-function-options.html>
- [63] R. M. Neal, *Bayesian Learning for Neural Networks*, 1st ed., ser. Lecture Notes in Statistics. New York, USA: Springer-Verlag, 1996, vol. 118. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9780387947242>
- [64] S. A. Billings, *Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118535561>
- [65] A. J. Martyr and M. A. Plint, *Engine Testing: The Design, Building, Modification and Use of Powertrain Test Facilities*, 4th ed. Oxford, Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2012. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/engine-testing/martyr/978-0-08-096949-7>
- [66] B. Mason, W. Bradley, A. Pezouvanis, and K. Ebrahimi, "Repeatable steady-state measurement of particulate number emissions in engine experiments," *International Journal of Engine Research*, vol. 17, no. 10, pp. 1108–1117, 2016. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1468087416643667>
- [67] I. M. Fukuda, C. F. F. Pinto, C. d. S. Moreira, A. M. Saviano, and F. R. Lourenço, "Design of Experiments (DoE) applied to Pharmaceutical and Analytical Quality by Design (QbD)," *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 54, 2018. [Online]. Available: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1984-82502018000700405&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- [68] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization

- in analytical chemistry,” *Talanta*, vol. 76, no. 5, pp. 965–977, Sep. 2008. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18761143>
- [69] K. Moraal, *Manned Systems Design: Methods, Equipment, and Applications*, ser. III Human Factors. Springer US, 1981. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9780306408045>
- [70] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, ser. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, 2009. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Response+Surface+Methodology%3A+Process+and+Product+Optimization+Using+Designed+Experiments%2C+4th+Edition-p-9781118916018>
- [71] *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. NIST - U.S. Department of Commerce, 2013. [Online]. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>
- [72] A. C. Atkinson and A. N. Donev, *Optimum Experimental Designs*, ser. Oxford Statistical Science Series. Oxford, New York: Oxford University Press, Aug. 1992. [Online]. Available: <https://global.oup.com/academic/product/optimum-experimental-designs-9780198522546?cc=rs&lang=en&>
- [73] NCSS Statistical Software, “D-Optimal Designs,” 2019. [Online]. Available: https://www.ncss.com/wp-content/themes/ncss/pdf/Procedures/NCSS/D-Optimal_Designs.pdf
- [74] C. Robert and G. Casella, *Monte Carlo Statistical Methods*, 2nd ed., ser. Springer Texts in Statistics. New York: Springer-Verlag, 2004. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9780387212395>
- [75] D. M. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code,” vol. 21, no. 2, pp. 239–245, 1979. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/1268522?seq=1>
- [76] C. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, 1st ed., ser. Information Science and Statistics. New York: Springer-Verlag, 2006. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9780387310732>

- [77] Vladan Radivojević, “Klasifikacija latinskih kvadrata,” Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Beograd, 2019. [Online]. Available: <http://elibrary.matf.bg.ac.rs/bitstream/handle/123456789/1781/V.Radivojevic%20KLASIFIKACIJA%20LATINSKIH%20KVADRATA.pdf?sequence=1>
- [78] Xin Li, “Numerical Methods for Engineering Design and Optimization,” Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2014. [Online]. Available: https://users.ece.cmu.edu/~xinli/classes/cmu_18660/
- [79] L. Pronzato and W. Müller, “Design of computer experiments: space filling and beyond | SpringerLink,” *Statistics and Computing*, vol. 22, no. 3, pp. 681–701, 2012. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11222-011-9242-3>
- [80] A. R. Krommer and C. W. Ueberhuber, *Numerical Integration - on Advanced Computer Systems*, 1st ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994, vol. 848. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783540584100>
- [81] Josef Dick and Friedrich Pillichshammer, *Discrepancy Theory and Quasi-Monte Carlo Integration*, ser. Lecture Notes in Mathematics. Springer, Cham, 2014, vol. 2107. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-04696-9_9
- [82] R. Hofer, “Generalizations of van der Corput-Halton sequences,” Banff, Canada, 2015. [Online]. Available: <http://www.birs.ca//workshops//2015/15w5047/files/TalkHofer.pdf>
- [83] J. H. Halton, “On the efficiency of certain quasi-random sequences of points in evaluating multi-dimensional integrals,” *Numerische Mathematik*, vol. 2, 1960. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01386213>
- [84] J. H. Halton and G. B. Smith, “Algorithm 247: Radical-inverse quasi-random point sequence,” *Communications of the ACM*, vol. 7, no. 12, 1964. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/citation.cfm?doid=355588.365104>
- [85] Lemieux Christiane, *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Sampling*, ser. Springer Series in Statistics. New York, USA: Springer-Verlag, 2009. [Online]. Available: <https://www.springer.com/us/book/9780387781648>

- [86] I. M. Sobol', "On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals - ScienceDirect," *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 7, no. 4, pp. 86–112, 1967. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0041555367901449>
- [87] Henri Faure, "Discrépance de suites associées à un système de numération (en dimension s)," vol. 41, no. 4, pp. 337–351, 1982. [Online]. Available: <https://eudml.org/doc/205851>
- [88] H. Niederreiter, "Point Sets and Sequences with Small Discrepancy," *Monatshefte für Mathematik*, vol. 104, pp. 273–338, 1987. [Online]. Available: <https://eudml.org/doc/178356>
- [89] Bennett Fox, "SOBOL - The Sobol Quasirandom Sequence," Florida State University, US, 2019. [Online]. Available: https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/m_src/sobol/sobol.html
- [90] M. R. Kianifar, L. Campean, and D. Richardson, "Sequential DoE Framework for Steady State Model Based Calibration," *SAE International Journal of Engines*, vol. 6, no. 2, pp. 843–855, 2013. [Online]. Available: <https://saemobilus.sae.org/content/2013-01-0972/>
- [91] T. J. Santner, B. J. Williams, and W. I. Notz, *The Design and Analysis of Computer Experiments*. US: Springer, New York, NY, US, 2003. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9781441929921>
- [92] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, Jan. 1999.
- [93] M. Frigo and S. G. Johnson, "FFTW - The Fastest Fourier Transform in the West," 2018. [Online]. Available: <http://www.fftw.org/>
- [94] M. Allaby, Ed., *A Dictionary of Earth Sciences - Oxford Reference*, 3rd ed. Oxford University Press, 2018. [Online]. Available: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199211944.001.0001/acref-9780199211944>
- [95] G. C. Goodwin and R. L. Payne, *Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis*, 1st ed., ser. Mathematics in Science and Engineering 136. New York, NY, USA: Academic Press, 1977. [Online]. Available: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=00b3e652847c8a4c221e2170612da0c5>

- [96] O. Nelles and R. Isermann, "Identification of nonlinear dynamic systems classical methods versus radial basis function networks," in *Proceedings of 1995 American Control Conference - ACC'95*. IEEE, 1995. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/533847>
- [97] E. Wernholt, "Multivariable Frequency-Domain Identification of Industrial Robots," PhD thesis, Linköping University, Sweden, 2007. [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A16904&dswid=-4950>
- [98] R. Pintelon and J. Schoukens, *System Identification: A Frequency Domain Approach*, 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2012. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/System+Identification%3A+A+Frequency+Domain+Approach%2C+2nd+Edition-p-9780470640371>
- [99] T. Heinz and O. Nelles, "Vergleich von Anregungssignalen für Nichtlineare Identifikationsaufgaben," in *26. Workshop Computational Intelligence*, F. Hoffmann, E. Hüllermeier, and R. Mikut, Eds. Dortmund, Germany: KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2016, p. 280. [Online]. Available: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000060007>
- [100] W. Baumann, S. Schaum, K. Roepke, and M. Knaak, "Excitation Signals for Nonlinear Dynamic Modeling of Combustion Engines," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 1066–1067, 2008. [Online]. Available: [ExcitationSignalsforNonlinearDynamicModelingofCombustionEngines-1590.pdf](#)
- [101] C. Hametner, M. Stadlbauer, M. Deregnaucourt, S. Jakubek, and T. Winsel, "Optimal experiment design based on local model networks and multilayer perceptron networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 1, pp. 251–261, 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197612001224>
- [102] J. A. Gubner, *Probability and random processes electrical and computer engineers - Communications, information theory and signal processing*, 1st ed. University of Wisconsin, Madison, US: Cambridge University Press, 2006. [Online]. Available: <https://www.cambridge.org/rs/academic/subjects/engineering/communications-and-signal-processing/probability-and-random-processes-electrical-and-computer-engineers?format=HB&isbn=9780521864701>

- [103] K. I. Park, *Fundamentals of Probability and Stochastic Processes with Applications to Communications*, 1st ed. Holmdel, New Jersey, USA: Springer International Publishing, 2018. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783319680743>
- [104] T. Heinz and O. Nelles, "Excitation signal design for nonlinear dynamic systems with multiple inputs - A data distribution approach," *at - Automatisierungstechnik*, vol. 66, no. 9, pp. 714–724, 2018. [Online]. Available: <https://www.degruyter.com/view/j/auto.2018.66.issue-9/auto-2018-0027/auto-2018-0027.xml?lang=en>
- [105] S. Đinić, "Ispitivanje motora po redefinisanim voznom ciklusima," Diplomski rad, Univerzitet u Beogradu, Katedra za motore, Beograd, 2015.
- [106] C. Caroca, "In-Vehicle Testing," Turin, Italy, 2013. [Online]. Available: https://www.avl.com/documents/10138/0/Tech_Day_2013_MOVE.pdf/b7e739df-23ec-44cb-8f43-c9b05f29f09d
- [107] J. Gerstenberg, H. Hartlief, and S. Tafel, "RDE-Entwicklungsumgebung am hochdynamischen Motorprüfstand," *ATZextra*, vol. 20, no. 8, pp. 36–41, Sep. 2015. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s35778-015-0039-4>
- [108] J. Gerstenberg, C. Schyr, S. Sterzing-Oppel, and D. Trenkle, "RDE Engineering via Engine-in-the-loop Test-bench," *MTZ worldwide*, vol. 78, no. 6, pp. 16–23, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s38313-017-0073-2>
- [109] AVL List GmbH, "Model based development and calibration, 2nd AVL Italy Applications Customers Meeting," Graz, Austria, 2013. [Online]. Available: https://www.avl.com/documents/10138/0/MoBEO_Juventus_Stadium_Presentation.pdf/ad64db14-0fae-4470-a0cf-bc93592513bf
- [110] I. Kolendić and R. Jankov, *Ispitivanje motora sa unutrašnjim sagorevanjem*. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1987.
- [111] Vehicle E/E System Diagnostic Standards Committee, "E/E Diagnostic Test Modes SAE J1979_201702," 2017. [Online]. Available: https://www.sae.org/content/j1979_201702

- [112] Delphi Auto Parts, “Car and Light Commercial Vehicle DS Diagnostic Software,” 2019. [Online]. Available: <https://www.delphiautoparts.com/gbr/en/product/car-and-light-commercial-vehicle-ds-diagnostic-software>
- [113] National Instruments Corporation, “NI PXI-1042 Series User Manual,” Apr. 2004. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371088a.pdf>
- [114] National Instruments Corporation, “NI PXI-8186 User Manual,” 2003. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370747a.pdf>
- [115] S. Popović and N. Miljić, “4-kanalni univerzalni modul za kondicioniranje signala MSGA-41,” 2007, tehnicko rešenje 153/3, recenzenti: Prof. dr B. Reljin i Prof. dr D. Kandić. [Online]. Available: www.motori.mas.bg.ac.rs/tr
- [116] S. Popović, N. Miljić, and M. Cvetić, “Sistem za kontinualno merenje masenog protoka goriva FCMS-3000,” 2007, tehnicko rešenje 151/2, recezenti: Prof. dr B. Reljin i Prof. dr D. Kandić. [Online]. Available: www.motori.mas.bg.ac.rs/tr
- [117] AVL List GmbH, “AVL 753 Fuel Temperature Control,” 2007. [Online]. Available: <https://www.avl.com/-/avl-fuel-balance-and-fuel-temperature-control>
- [118] International Standard, “ISO 15550: Internal Combustion Engines - Determination an mothod for the measurement of engine power - General requirements,” 2002. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/28185.html>
- [119] AVL List GmbH, “AVL Cameo 2014,” Nov. 2014. [Online]. Available: https://www.avl.com/calibration-evaluate/-/asset_publisher/gYjUpY19vEA8/content/avl-cameo-
- [120] R. Pischinger, *Engine Indicating - User Handbook*. AVL LIST GmbH Graz, Jan. 2002.
- [121] AVL List GmbH, “AVL 3064 Angle Encoder,” 2010. [Online]. Available: <https://www.avl.com/web/guest/-/crank-angle-encoder-of-365-series>
- [122] AVL List GmbH, “AVL Indimaster Compact 670,” Feb. 2007. [Online]. Available: www.avl.com
- [123] AVL List GmbH, “Miniature Pressure Transducer - GM12D,” 2002. [Online]. Available: <https://www.avl.com/documents/10138/885965/AVL+Pressure+Sensors+for+Combustion+Analysis/6c844a54-7a84-429d-8e57-4f34e948f95d>

- [124] AVL List GmbH, "AVL 3066 A01 Indicating Amplifier," 2006. [Online]. Available: <https://www.avl.com/-/indicating-amplifiers>
- [125] AVL List GmbH, "MicroIFEM Piezo 4th Generation - Piezo Amplifier," 2013. [Online]. Available: <https://www.avl.com/documents/10138/2699442/MicroIFEM+4P4+Piezo>
- [126] AVL List GmbH, "AVL IndiCom 1.6," Dec. 2006. [Online]. Available: <https://www.avl.com/-/indicom-indicating-software>
- [127] AVL List GmbH, "AVL Concerto," 2014. [Online]. Available: <https://www.avl.com/web/guest/-/avl-concerto-5->
- [128] B. Brown, "catool - combustion analysis tool - Open Source Internal Combustion Engine Indicating and Cylinder Pressure Analysis Software," 2015. [Online]. Available: https://www.catool.org/files/catool_User_Guide_v5.pdf
- [129] A. Hribernik, "Statistical Determination of Correlation Between Pressure and Crankshaft Angle During Indication of Combustion Engines," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 982541, Oct. 1998. [Online]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/982541/>
- [130] N. Miljić, "Istraživanje optimalnog upravljanja sistemom paljenja oto-motora primenom neuronskih mreža," Ph.D. dissertation, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2012.
- [131] AVL List GmbH, "AVL PUMA Open," 2018. [Online]. Available: <https://www.avl.com/web/guest/-/avl-puma-open-2->
- [132] V. Petrović, "Automatizacija probnog stola za motore," Diplomski rad, Univerzitet u Beogradu, Katedra za motore, Beograd, 2015.
- [133] AVL List GmbH, "Smart Calibration - CAMEO Test & Measure," 2018. [Online]. Available: <https://www.avl.com/documents/10138/885965/CAMEO+TEST+and+MEASURE.pdf/979039e4-c9a8-4855-830c-e2b88a7dbbe6>
- [134] ETAS GmbH, "INCA Software Products - Software Products & Systems - ETAS," 2019. [Online]. Available: https://www.etas.com/en/products/inca_software_products.php

- [135] Dynosens-Rotronics, *Dyno Control Module PGB301 - User Manual*, La Roche sur Foron, France, 2014.
- [136] Dynosens-Rotronics, *High Dynamic Electronic Throttle Actuator - CEA301*, La Roche sur Foron, France, 2014.
- [137] “The Modbus Organization,” 2019. [Online]. Available: <http://modbus.org/>
- [138] “EtherCAT Technology Group | HOME,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ethercat.org/default.htm>
- [139] “PROFIBUS & PROFINET International (PI),” 2019. [Online]. Available: <https://www.profibus.com/>
- [140] Modbus Organization, “Modbus Application Protocol V1 1b3,” 2019. [Online]. Available: http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
- [141] Dynosens-Rotronics, *MODBUS Register DCP301/PGB301*. La Roche sur Foron, France: Rotronics, 2014.
- [142] D. Comer, *Internetworking with TCP/IP: Principles, protocols, and architecture*. Prentice Hall, 2006.
- [143] J. Davies and T. Lee, *Microsoft Windows Server 2003 TCP/IP Protocols and Services Technical Reference*, 1st ed. Redmond, Wash: Microsoft Press, Mar. 2003.
- [144] A. Heindl, “Simple CAMEO Server,” 2015, final/ rev. 6.
- [145] National Instruments Corporation, “Application Design Patterns: Producer/Consumer - National Instruments,” 2019. [Online]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/3023/en/>
- [146] R. Bitter, T. Mohiuddin, and M. Nawrocki, *LabView: Advanced Programming Techniques, Second Edition*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Sep. 2006.
- [147] G. Fehl, “Entwicklung einer Meßstrategie zur kontinuierlichen Erfassung von Kennlinien auf Motorenprüfständen,” PhD thesis, Technische Hochschule Darmstadt, Graz, Austria, 1992.

- [148] A. Schwarte, L. Hack, R. Isermann, H.-G. Nitzke, J. Jeschke, and J. Piewek, "Automatisierte Applikation von Motorsteuergeräten mit kontinuierlicher Motorvermessung," in *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2004*. Düsseldorf: VDI-Verl., Mar. 2004. [Online]. Available: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/24589/>
- [149] L. Grujić and D. Lazić, *Automatsko upravljanje*. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007, skripta.
- [150] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 7th ed. Boston: Pearson, May 2014. [Online]. Available: <https://www.pearson.com/store/p/feedback-control-of-dynamic-systems/P100000775897>
- [151] P. Mrđa, N. Miljić, S. Popović, and M. Kitanović, "A method for quick estimation of engine moment of inertia based on an experimental analysis of transient working process," *Thermal Science, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade*, vol. 22, no. 3, pp. 1215–1225, 2018. [Online]. Available: <http://thermalscience.vinca.rs/online-first/2578>
- [152] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2nd ed. California, US: California Technical Publishing, 1999. [Online]. Available: <https://www.dspguide.com/pdfbook.htm>
- [153] S. J. Orfanidis, *Introduction to Signal Processing*. New Jersey, US: Prentice Hall, 1996. [Online]. Available: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/intro2sp/>
- [154] N. Cavina, G. Mancini, E. Corti, D. Moro, M. De Cesare, and F. Stola, "Thermal Management Strategies for SCR After Treatment Systems." Napoli, Italy: SAE International, 2013, p. 10. [Online]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2013-24-0153/>
- [155] R. A. Fisher and F. Yates, *Statistical tables for biological, agricultural and medical research*, 6th ed. New York, USA: Hafner Press, 1963. [Online]. Available: <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/10701>
- [156] H. Akaike, "A new look at the statistical model identification," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, no. 6, pp. 716 – 723, 1974. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1100705>

- [157] B. Hartmann, T. Ebert, T. Fischer, J. Belz, G. Kampmann, and O. Nelles, “LMNtool - Toolbox zum automatischen Trainieren lokaler Modellnetze,” in *Proceedings. 22. Workshop Computational Intelligence*, F. Hoffmann and E. Hüllermeier, Eds., vol. 45. Dortmund: KIT Scientific Publishing, 2012, pp. 341–355. [Online]. Available: <https://www.mb.uni-siegen.de/mrt/lmn-tool/index.html?lang=en>
- [158] Y. Collette, “Planification d’expériences,” Renault - Direction de la Recherche, 2006. [Online]. Available: http://ycollette.free.fr/Tools/Papers/Cours/01_Model_V3.pdf
- [159] B. Delaunay, “Sur la sphère vide - A la mémoire de Georges Voronoï, . Classe des sciences mathématiques et na, 1934, no. 6, 793–800,” *Bulletin de l’Académie des Sciences de l’URSS, Classe des sciences mathématiques*, no. 6, pp. 793–800, 1934. [Online]. Available: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=im&paperid=4937&option_lang=eng
- [160] MathWorks, “Working with Delaunay Triangulations - MATLAB & Simulink,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/delaunay-triangulation.html>
- [161] Cambustion Limited, “CLD500 Fast NOx Analyzer,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cambustion.com/sites/default/files/instruments/CLD500/Cambustion500seriesgasanalyzers.pdf>
- [162] Cambustion Limited, “FID600 and HFR500 Fast HC Analyzers,” 2019. [Online]. Available: www.cambtest.myzen.co.uk/sites/default/files/instruments/FID600/2019%20FID600%20Brochure.pdf
- [163] Cambustion Limited, “NDIR500 Fast CO & CO2 Analyzer,” 2019. [Online]. Available: www.cambustion.com/products/ndir500
- [164] W. J. Cook, *In Pursuit of the Traveling Salesman: Mathematics at the Limits of Computation*, first edition edition ed. Princeton, N.J: Princeton University Press, Jan. 2012. [Online]. Available: <https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691163529/in-pursuit-of-the-traveling-salesman>
- [165] G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson, “Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem,” *Journal of the Operations Research Society of America*, vol. 2, no. 4, pp. 393–410, 1954. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/166695>

- [166] C. E. Miller, A. W. Tucker, and R. A. Zemlin, “Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems,” *J. ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326–329, Oct. 1960. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/321043.321046>
- [167] Robert Sedgewick and Kevin Wayne, *Algorithms*, 4th ed. Boston, Massachusetts, USA: Addison-Wesley, 2011. [Online]. Available: <https://algs4.cs.princeton.edu/home/>
- [168] D. P. Williamson and D. B. Shmoys, *The Design of Approximation Algorithms*, 1st ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2011. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1971947>
- [169] W. Cook, “World Traveling Salesman Problem,” 2019. [Online]. Available: <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/world/>
- [170] D. J. Rosenkrantz, R. E. Stearns, and P. M. Lewis, “An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem,” *Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 6, no. 3, pp. 563–581, 1977. [Online]. Available: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/0206041?mobileUi=0>
- [171] Robert Sedgewick and Kevin Wayne, “Minimum Spanning Trees,” in *Algorithms*, 4th ed. Boston, Massachusetts, USA: Addison-Wesley, 2011. [Online]. Available: <https://algs4.cs.princeton.edu/43mst/>
- [172] “Domishold Graphs - Threshold Graphs and Related Topics,” in *Annals of Discrete Mathematics*, N. Mahadev and U. Peled, Eds. Elsevier, 1995, pp. 313–326.
- [173] W. B. March, P. Ram, and A. G. Gray, “Fast Euclidean Minimum Spanning Tree: Algorithm, Analysis, and Applications,” in *Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, ser. KDD '10. New York, USA: ACM, 2010, pp. 603–612, event-place: Washington, DC, USA. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1835804.1835882>
- [174] F. Harary, *Graph Theory*, 1st ed. University of Michigan, USA: Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1969. [Online]. Available: <https://mathscinet.ams.org/mathscinet-getitem?mr=0256911>
- [175] N. L. Biggs, E. K. Lloyd, and R. J. Wilson, *Graph Theory 1736-1936*. New York, USA: Clarendon Press, 1999.

- [176] E. W. Weisstein, “Hamiltonian Cycle,” 2019. [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/HamiltonianCycle.html>
- [177] N. Christofides, “Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem,” Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, USA, Pennsylvania, Tech. Rep., 1976. [Online]. Available: https://www.bibsonomy.org/bibtex/2107ce5afe4cdd886e5cf863b16533205/jvrb_regulski
- [178] S. Lin, “Computer solutions of the traveling salesman problem,” *Nokia Bell Labs Journals & Magazine*, vol. 44, no. 10, pp. 2245–2269, 1965. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6767727/authors#authors>
- [179] S. Lin and B. W. Kernighan, “An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem,” *Operations Research*, vol. 21, no. 2, pp. 498–516, 1973. [Online]. Available: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/opre.21.2.498>
- [180] K. Helsgaun, “LKH Version 2.0.9,” 2018. [Online]. Available: <http://akira.ruc.dk/~keld/research/LKH/>
- [181] K. Helsgaun, “An Effective Implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic,” Department of Computer Science Roskilde University, Roskilde, Denmark, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: http://akira.ruc.dk/~keld/research/LKH/LKH-2.0/DOC/LKH_REPORT.pdf
- [182] o. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MA, United States: The MIT Press, 1992. [Online]. Available: <https://mitpress.mit.edu/books/adaptation-natural-and-artificial-systems>
- [183] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. MA, United States: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 1989.
- [184] J. Kirk, “Open Traveling Salesman Problem - Genetic Algorithm - MATLAB Central,” 2014. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21196-open-traveling-salesman-problem-genetic-algorithm>
- [185] National Instruments Corporation, “NI PXI-4070 Specifications,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371304j.pdf>

- [186] National Instruments Corporation, “NI 6122/6123 Specifications,” 2005. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371396b.pdf>
- [187] National Instruments Corporation, “NI 6229 Device Specifications,” 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375204c.pdf>
- [188] National Instruments Corporation, “DAQ NI 660x User Manual, NI 6601, NI 6602, and NI 6608 Devices,” 2012. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372119c.pdf>
- [189] National Instruments Corporation, “CAN NI-CAN Hardware and Software Manual,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370289t.pdf>

Biografija

Lični podaci:

Ime i prezime: Predrag Mrđa

Datum rođenja: 30.05.1986.

Mesto rođenja: Beograd, Srbija

Obrazovanje:

1993 - 2001 Osnovna škola „Josif Pančić”, Beograd

2001 - 2005 Četvrta gimnazija u Beogradu

2005 - 2008 Osnovne akademske studije, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

2008 - 2010 Diplomске akademske studije, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Katedra za motore

20.10.2010 Odbranjen diplomski rad pod naslovom „Modelski zasnovana kalibracija upravljačkih parametara motora SUS”, sa ocenom 10, mentor: doc. dr Miloš Cvetić

2010 - 2020 Doktorske akademske studije, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Katedra za motore

2012 LMS Imagine.Lab AMESim - Driving performance, fuel economy and emissions, Minhen, Nemačka

Radno iskustvo:

2011 - 2013 Istraživač-saradnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Katedra za motore

2013 - 2019 Asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Katedra za motore

2019 - 2020 Samostalni stručnotehnički saradnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Katedra za motore

Stručna takmičenja:

Formula Student Formula ATA, Italija, 2012., 2013., 2014. i 2016.

FS Czech, Republika Češka, 2013.

FSH, Mađarska, 2013. i 2016.

FSA, Austrija, 2014.

LabVIEW BMiT - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2011. i 2012.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Предраг Мрђа

Број индекса: Д17-10

Изјављујем

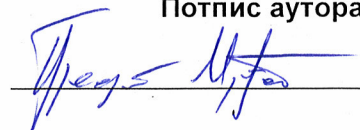
да је докторска дисертација под насловом:

Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 6.8.2020.

Потпис аутора



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Предраг Мрђа

Број индекса: Д17-10

Студијски програм: Мотори СУС

Наслов рада: Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода

Ментор: проф. др Ненад Миљић

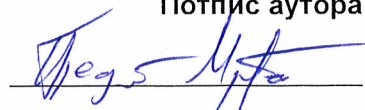
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 6.8.2020.

Потпис аутора



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 6.8.2020.

Потпис аутора

