

DEGALŲ ORO SANTYKIO ĮTAKOS VARIKLIO GALIAI IR IŠMETAMŲJŲ DUJŲ KOKYBEI TYRIMAS

Gabija Januševičiūtė, lekt. Tomas Kalinauskis
Šiaulių valstybinė kolegija, Aušros al. 40, Šiauliai

Anotacija

Straipsnyje nagrinėjamas oro–kuro mišinio (AFR) poveikis variklio galiai ir išmetamųjų dujų kokybei. Aprašoma bandymų eiga naudojant originalią (stock) ir modifikuotą (chip) ECU programą. Analizuojami galios matavimai ant stendo, diagnostiniai rodmenys bei emisijų duomenys, gauti taikant Bosch ESI ir EGA5 analizės sistemas. Išryškinama AFR reikšmė degimo efektyvumui ir emisijų kontrolei. Įvertinama, kaip pariebtas mišinys veikia galios kreivę bei mažina NOx emisijas.

Pagrindiniai žodžiai: AFR, variklio galia, emisijos, *chip tuning*, ECU kalibracija.

Įvadas

Tyrimo aktualumas ir problematika. Vidaus degimo variklio efektyvumas ir emisijų lygis tiesiogiai priklauso nuo degimo proceso kokybės, kurią lemia oro ir degalų mišinio (AFR – air-fuel ratio) santykis. Nors gamintojai sukalibruoja AFR siekdami balanso tarp galios, degimo švarumo ir kuro sąnaudų, praktikoje vis dažniau taikomos variklio valdymo modifikacijos („chip tuning“), leidžiančios šiuos parametrus koreguoti. Praturtintas mišinys (t. y. sumažintas AFR) gali pagerinti variklio trauką ir sumažinti NOx emisijas, tačiau taip pat turi įtakos CO ir HC emisijų lygiui. Todėl labai svarbu išnagrinėti, kaip konkrečios AFR korekcijos veikia galios kreivę bei išmetamųjų dujų sudėtį skirtingais variklio darbo režimais.

Tyrimo tikslas – eksperimentiniu būdu nustatyti, kaip oro–kuro mišinio santykio pokyčiai veikia variklio galią ir išmetamųjų dujų kokybę.

Tyrimo uždaviniai: 1) Ištirti variklio veikimą esant originaliai (OEM) ECU kalibracijai; 2) Atlikti ECU modifikacijas ir pritaikyti skirtingus AFR nustatymus; 3) Palyginti variklio galios bei emisijų rezultatus tarp „stock“ ir „chip“ konfigūracijų.

Tyrimo metodas – eksperimentinis: naudoti variklio galios stendas (dyno), Bosch ESI diagnostikos sistema ir EGA5 emisijų analizatorius.

1. Analitinė dalis

1.1 Vidaus degimo variklio degimo proceso pagrindas

Kiekvieno benzininiu kuru varomo vidaus degimo variklio veikimo esmė yra efektyvus degalų ir oro mišinio degimas. Degimo proceso efektyvumą labiausiai lemia degalų mišinio sudėtis – ji daro įtaką tiek variklio galiai, tiek emisijoms. Vienas svarbiausių parametrų – oro ir degalų santykis, kuris nusako, kiek oro pagal masę sunaudojama vienam kilogramui degalų sudeginti [1].

Optimaliomis sąlygomis naudojamas vadinamasis stochiometrinis santykis – 14,7:1. Tai reiškia, kad deginant vieną kilogramą benzininių degalų reikia 14,7 kg oro. Siekiant tikslumo, šis santykis vertinamas pagal lambda (λ) koeficientą:

- $\lambda < 1$ – turtingas (riebus) mišinys,
- $\lambda = 1$ – stochiometrinis,
- $\lambda > 1$ – liesas mišinys [1].

1.2 Mišinio sudėties įtaka variklio darbui

Mišinio tipas tiesiogiai veikia variklio charakteristikas:

- 1 Turtingas mišinys pagerina uždegimo stabilumą, padidina variklio galią, bet didina kuro sąnaudas ir emisijas (ypač CO ir HC) [2].
- 2 Liesas mišinys leidžia mažinti degalų sunaudojimą, bet kelia degimo temperatūrą ir padidina NO_x emisijas [2].
- 3 Stechiometrinis mišinys yra kompromisas tarp galios, efektyvumo ir emisijų, todėl jis pageidautinas daugeliui darbinių režimų [1].

Degimo kokybė taip pat turi įtakos variklio ilgaamžiškumui, katalizatoriaus veiksmingumui bei atitiktčiai aplinkosaugos normoms [1].

Norint užtikrinti optimalų oro ir degalų santykį esant skirtingiems variklio darbo režimams, būtina taikyti pažangias mišinio reguliavimo sistemas.

1.3 Mišinio reguliavimo principai: jutikliai ir ECU

Siekiant tiksliai reguliuoti degimo procesą, naudojama integruota variklio valdymo sistema (ECU). Ji remiasi kelių jutiklių signalais, kad galėtų optimaliai dozuoti tiek degalus, tiek orą [3].

Svarbiausi jutikliai:

- MAF (oro srauto jutiklis) – matuoja įsiurbiamo oro kiekį,
- MAP (slėgio jutiklis) – nustato kolektoriaus slėgį, naudojamas, kai MAF nėra,
- IAT (oro temperatūros jutiklis) – padeda tikslinti mišinio tankį,
- Lambda jutikliai – fiksuoja deguonies kiekį išmetimo dujose, leidžia nustatyti faktinį mišinio santykį [3].

1.4 Oro padavimo valdymo technologijos

Be tiesioginio degalų įpurškimo valdymo, šiuolaikiniai varikliai naudoja įvairias oro tiekimo reguliavimo technologijas, kurios leidžia prisitaikyti prie skirtingų variklio darbo režimų [3]:

- VVT (Variable Valve Timing) – reguliuoja vožtuvų atsidarymo ir užsidarymo laiką,
- VVL (Variable Valve Lift) – keičia vožtuvų pakėlimo aukštį,
- Elektroninis droselio valdymas (Drive-by-Wire) – leidžia tiksliai valdyti oro srautą,
- Kintamos geometrijos įsiurbimo kolektoriai – pritaiko oro tėkmės greitį ir slėgį [3].

Šios technologijos padeda sudaryti optimalų oro ir degalų mišinį net esant dideliame apkrovos svyravimui.

1.5 Emisijų susidarymas ir valdymas

Degimo proceso metu susidaro šie pagrindiniai teršalai:

- CO (anglies monoksidas) – susidaro degalams nevisiškai sudegus,
- HC (angliavandeniliai) – nesudegusių degalų liekanos,
- NO_x (azoto oksidai) – atsiranda esant aukštai temperatūrai [4].

Visi šie teršalai pavojingi aplinkai ir žmogaus sveikatai. Jų kiekis tiesiogiai priklauso nuo oro ir degalų santykio bei degimo efektyvumo [2, 4]. Todėl efektyvus degimo kontrolės sistemos darbas yra esminis siekiant atitikti griežtėjančius tarptautinius aplinkosaugos standartus.

1.6 Trijų komponentų katalizatoriaus (TWC) vaidmuo

Trijų komponentų katalizatorius (TWC) – tai pagrindinė emisijų mažinimo technologija benzininiuose automobiliuose. Jis vienu metu mažina tris pagrindinius teršalus:

1. $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ – oksidacijos reakcija,
2. $\text{HC} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ – oksidacija,
3. $\text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$ – redukcijos reakcija [5].

TWC veikia efektyviausiai, kai oro ir degalų mišinys yra artimas $\lambda = 1$ (stechiometrinis). Todėl ECU siekia palaikyti šį balansą, pasitelkdamas lambda jutiklių grįžtamąjį ryšį [5].

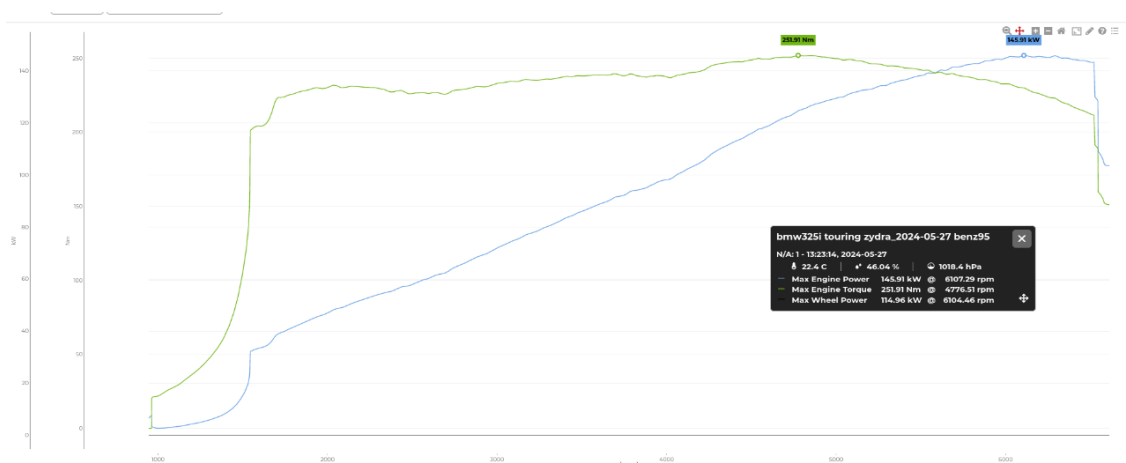
2. Tiriamoji dalis

2.1 Bazinių variklio parametrų analizė – gamyklinė valdymo programos konfigūracija

Tyrimo pradžioje buvo nustatyti baziniai variklio darbo parametrai, naudojant originalią gamyklinę variklio valdymo programą (OEM). Šie duomenys buvo pasitelkti kaip etalonas, siekiant palyginti su vėliau pritaikyta modifikuota programa.

Eksperimentai atlikti naudojant inercinį dinamometrinių stendą „DynoMag“. Automobilis buvo prijungtas per stebulinius adapterius, leidžiančius išvengti trinties ir slydimo paklaidų. Tokia jungtis užtikrina didelį matavimų tikslumą ir pakartojamumą.

Stendas fiksavo variklio galią ir sukimo momentą visame darbo diapazone (1750–6500 aps./min), laikantis vienodų bandymo sąlygų: pilnai išilęs variklis, pastovi aušinimo skysčio temperatūra ir vienoda degalų sudėtis.

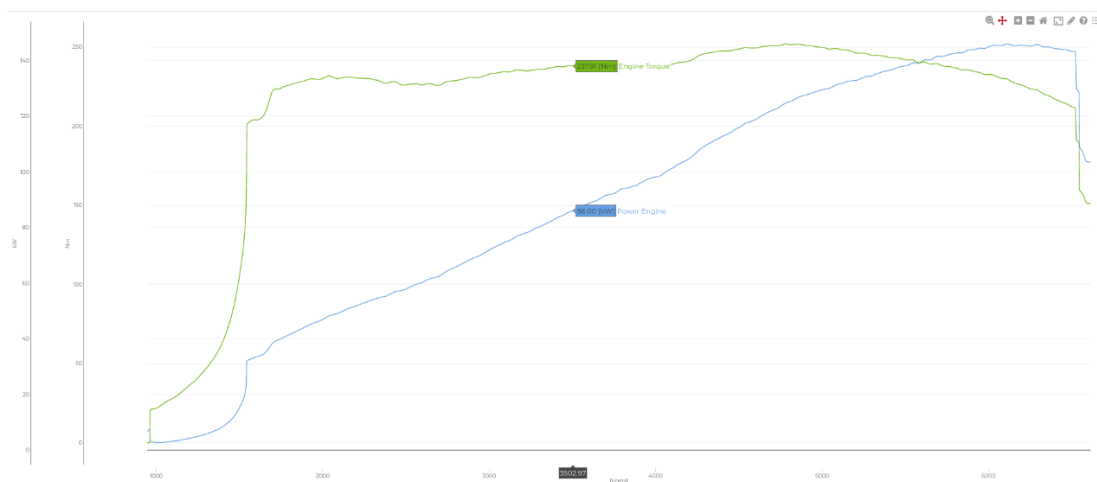


2.1 pav. BMW 325i (M54B25) variklio galios ir sukimo momento diagrama su gamykline valdymo programa.

Klaida! Dokumente nėra nurodyto stiliaus teksto..1 lentelė
Variklio galios ir sukimo momento rezultatai

Parametras	Reikšmė
Oro temperatūra	22.4 °C
Drėgmė	46.04 %
Atmosferos slėgis	1018.4 hPa
Maksimali variklio galia	145.91 kW prie 6107.29 aps/min
Maksimalus sukimo momentas	251.91 Nm prie 4776.61 aps/min
Maksimali galia ratuose	114.96 kW prie 6104.46 aps/min

Rezultatai rodo, kad tiek galia, tiek sukimo momentas viršijo OEM ribines vertes (atitinkamai 141 kW ir 245 Nm). Tai galėjo lemti palankios aplinkos sąlygos arba variklio techninis įdirbis. Galios kreivės tolygumas liudija stabilią ECU kalibraciją bei efektyvų degimo procesą.

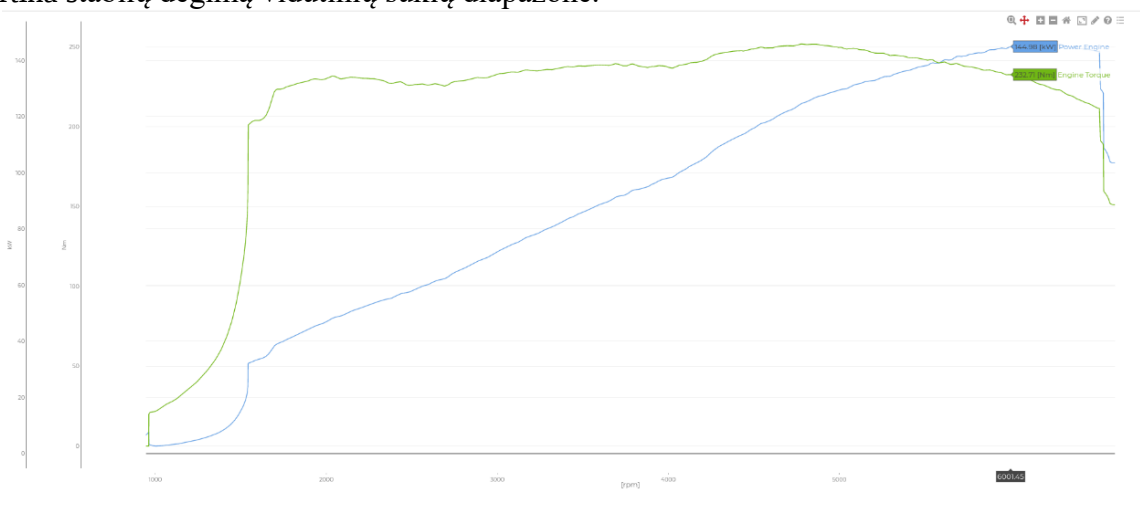


2.2 pav. Variklio darbo parametrai ties 3500 aps./min (BMW 325i M54B25)

Šiame sūkių taške, kuris teoriškai atitinka maksimalų sukimo momentą, buvo užfiksuoti šie duomenys:

- Sukimo momentas – 237,92 Nm
- Galia – 85,96 kW

Nors sukimo momentas šiek tiek mažesnis nei OEM specifikacijoje, kreivės forma išlieka tolygi. Tai patvirtina stabilų degimą vidutinių sūkių diapazone.



2.3 pav. Variklio darbo taškas ties 6000 aps./min (BMW 325i M54B25)

Matuojant maksimalios galios zonoje, nustatyta:

- Galia – 144,93 kW
- Sukimo momentas – 232,69 Nm

Gauti rezultatai viršija OEM specifikacijas. Sklandi galios kreivė rodo efektyvią ECU valdymo logiką ir atskleidžia konstrukcinį variklio potencialą dirbant aukštuose sūkiuose.

2.Klaida! Dokumente nėra nurodyto stiliaus teksto. lentelė
Variklio galia ir sukimo momentas pagal „DynoMag“ stendo matavimus (gamyklinė programa)

Variklio sūkiai (aps./min)	Sukimo momentas (Nm) – Stock	Galios (kW) – Stock
1750	224,00	40,01
2000	230,39	47,10
2250	230,18	52,99
2500	226,13	57,95
2750	228,32	64,46

3000	233,07	71,98
3250	235,35	78,84
3500	237,92	85,96
3750	238,15	92,19
4000	237,25	98,15
4250	244,23	107,38
4500	248,80	116,00
4750	251,11	123,48
5000	249,71	129,49
5250	246,12	134,08
5500	242,27	138,16
5750	237,74	141,91
6000	232,69	144,93
6250	223,62	145,12
6500	212,60	143,38

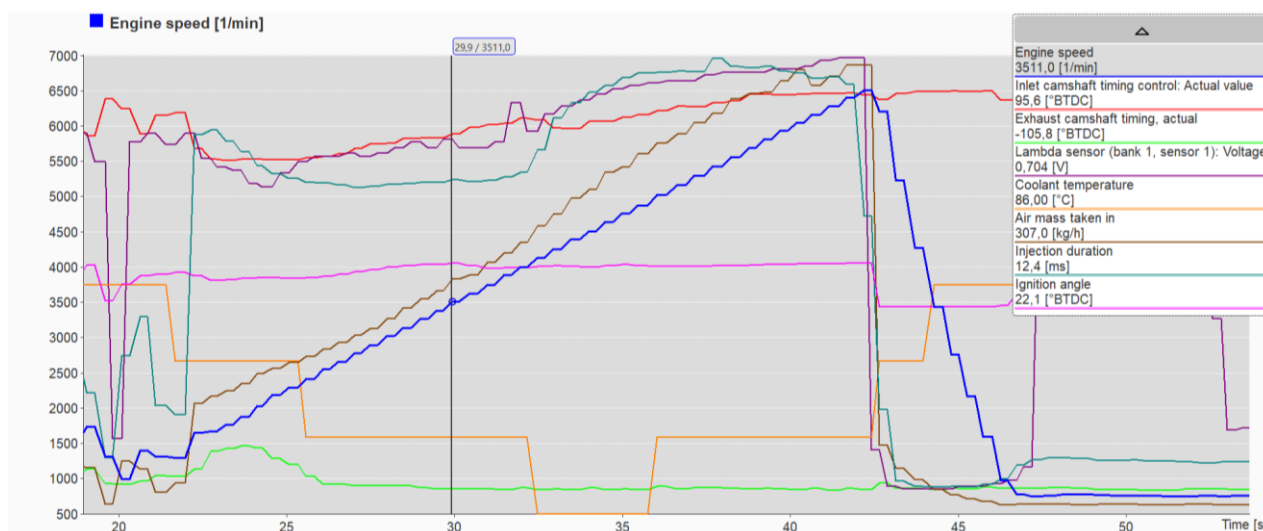
Gamyklinė variklio valdymo programa užtikrina stabilų ir patikimą variklio veikimą visame sūkių diapazone. Galios kreivė kilo nuosekliai, be staigių šuolių ar kritimų, o sukimo momentas buvo tolygiai paskirstytas. Tokia dinamika būdinga gerai sukalibruotai OEM valdymo logikai.

2.2 Diagnostinių duomenų analizė – originali valdymo programa

Siekiant tiksliai įvertinti variklio darbo charakteristikas su gamykline programine įranga, atlikta papildoma diagnostinė analizė. Jos tikslas – užfiksuoti degimo procesų parametrus bei išmetamųjų dujų sudėtį tuščiosios eigos ir dalinės apkrovos režimuose. Ypatingas dėmesys skirtas oro ir degalų mišinio santykiui (AFR), stebint, ar variklis dirba arti stoichiometrinės būsenos ($AFR \approx 14,7 : 1$).

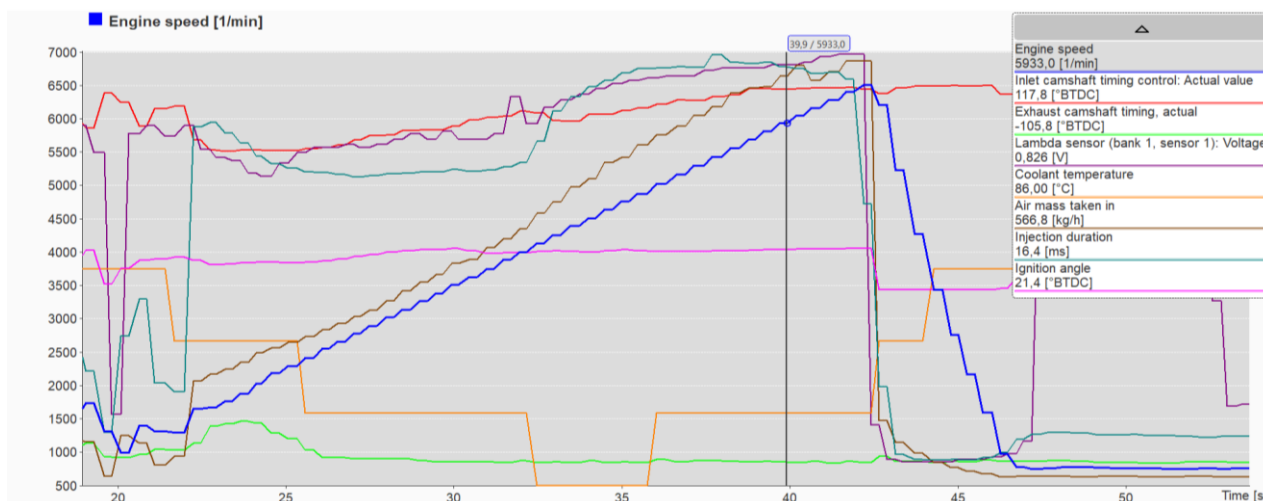
Naudota diagnostinė įranga:

- Bosch ESITronic – elektroninė diagnostikos sistema variklio parametrus (lambda zondo reikšmė, oro srautas, uždegimo kampas ir kt.) registruoti.
- EGA5 emisijų analizatorius – degimo produktų koncentracijai (CO , CO_2 , O_2 , HC , NO , NO_x) įvertinti.
-



2.4 pav. Variklio darbo parametrų kitimo diagrama ties 3500 aps./min naudojant Bosch ESITronic sistemą su originalia ECU valdymo programa (BMW 325i, M54B25).

Gamyklinė ECU programa rodo stabilų oro srautą, įpurškimo trukmę ir lambda reikšmę. Uždegimo kampas ($\sim 22^\circ$ BTDC) patvirtina optimalų degimo pradžios tašką ir stoichiometrinę režimą dalinės apkrovos metu.



2.5 pav. Variklio darbo parametrų kitimo diagrama ties 6000 aps./min naudojant Bosch ESItronic sistemą su originalia ECU programa.

Ties 6000 aps./min. fiksuotas padidėjęs oro srautas ir įpurškimo trukmė. Lambda reikšmė (~0,718 V) rodo turtingesnę mišinį, reikalingą maksimaliam našumui. Uždegimo kampas išlieka padidėjęs, užtikrinant efektyvų degimą.

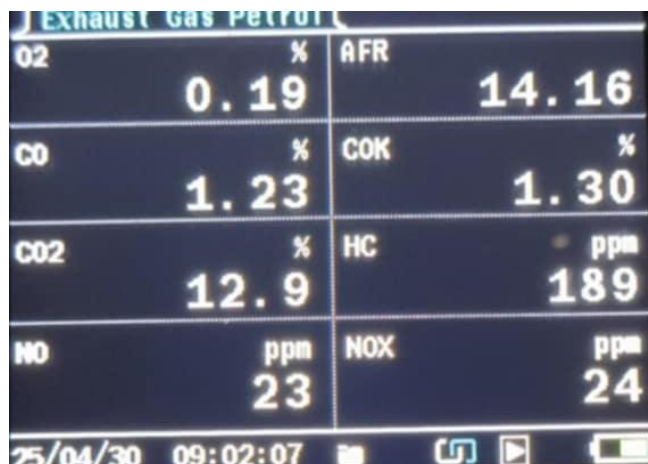
2.3 lentelė

Variklio darbo parametrų diagnostika naudojant „Bosch ESItronic“ – gamyklinė valdymo programa

Variklio sūkių dažnis [aps./min]	Įsiurbimo paskirstymo fazė BTDC [°]	Išmetimo paskirstymo fazė BTDC [°]	Lambda zondo įtampa [V]	Aušinimo skysčio temperatūra [°C]	Įsiurbiamo oro masė [kg/h]	Įpurškimo trukmė [ms]	Uždegimo kampas [° iki VMT]
1763.0	80,6	-82,9	0.745	89.0	161.0	13.8	12.8
2030.0	81,4	-82,5	0.75	89.0	183.8	12.9	13.9
2290.0	81	-91,9	0.755	89.0	198.0	12.4	13.5
2551.0	82,9	-103,1	0.758	89.0	215.8	12.3	14.6
2777.0	87,4	-103,9	0.76	89.0	233.2	12.1	17.2
3024.0	90,4	-103,9	0.763	89.0	255.5	12.2	19.9
3266.0	93,4	-105,0	0.765	89.0	281.2	12.3	21.4
3511.0	95,6	-105,8	0.767	89.0	307.0	12.4	22.1
3742.0	100,9	-105,8	0.769	89.0	328.8	12.4	19.1
3997.0	104,6	-105,0	0.772	89.0	355.2	12.7	19.5
4256.0	99,0	-105,8	0.775	89.0	392.5	14.7	20.6
4507.0	102,8	-105,0	0.778	89.0	424.2	15.6	19.9
4758.0	105,0	-105,8	0.78	89.0	454.2	16.2	21.4
5020.0	108,8	-104,2	0.782	89.0	485.0	16.4	20.2
5296.0	111,0	-105,0	0.784	89.0	511.8	16.4	20.2
5555.0	114,4	-105,4	0.786	89.0	543.0	16.6	20.6
5690.0	118,1	-105,8	0.788	89.0	550.2	16.5	21.0
5933.0	117,8	-105,8	0.79	89.0	566.8	16.4	21.4
6281.0	118,5	-106,5	0.792	89.0	572.8	16.2	21.8
6510.0	117,8	-106,1	0.794	89.0	587.5	11.0	22.1

Duomenys rodo, kad ECU efektyviai palaiko optimalų kuro mišinio santykį – lambda reikšmė svyruoja nuo 0,745 iki 0,794 V, o tai artima stoichiometrinei vertei. Įpurškimo trukmė ir oro srautas proporcingi sūkiams, uždegimo kampas išlieka stabilus – tai būdinga uždarnosios valdymo sistemos elgsenai.

Papildomai, emisijų analizė su EGA5 leido įvertinti degimo kokybę, kuro mišinio sudėtį ir emisijų atitikimą reikalavimams.



2.6 pav. Išmetamųjų dujų sudėties rodmenys benzininio variklio darbo metu, užfiksuoti naudojant EGA5 analizatorių

AFR – 14,16 (arti stoichiometrinės),

- CO – 1,23 %, HC – 189 ppm, NO_x – 24 ppm, O₂ – 0,19 %, CO₂ – 12,9 %, COK – 1,30

Tai rodo stabilų variklio darbą ir optimaliai sureguliuotą kuro mišinį.

2.4 lentelė

Išmetamųjų dujų sudėties analizė naudojant „EGA5“ – gamyklinė valdymo programa

Variklio sūkiai, aps/min	O ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NOX (ppm)	HC (ppm)	COK (%)	AFR
1500	0,19	1,23	12,9	23	24	189	1,3	14,16
1750	0,15	1,38	12,8	24	25	283	1,46	14
2000	0,14	1,52	12,8	26	26	342	1,59	13,91
2250	0,13	1,66	12,7	28	29	356	1,73	13,83
2500	0,13	1,81	12,6	31	32	357	1,88	13,77
3000	0,13	1,96	12,6	32	34	329	2,03	13,71
3250	0,12	2,1	12,6	36	38	314	2,15	13,67
3500	0,12	2,23	12,5	44	46	268	2,27	13,64
3750	0,13	2,34	12,4	47	49	254	2,38	13,6
4000	0,13	2,58	12,2	64	63	194	2,61	13,53
4250	0,14	2,58	12,2	68	71	194	2,62	13,48
4500	0,14	2,89	12	75	79	178	2,92	13,41
4750	0,14	3	11,9	82	86	166	3,02	13,37
5000	0,15	3,43	11,6	90	94	153	3,43	13,19
5250	0,15	3,76	11,5	97	102	153	3,73	13,05
5500	0,14	3,92	11,3	104	109	142	3,87	12,99
5750	0,22	4,22	11,1	111	116	142	4,13	12,92
6000	0,22	3,78	9,6	148	155	102	4,25	12,75
6250	0,22	3,50	9,4	150	157	98	4,10	12,7
6500	0,22	3,30	9,2	152	160	95	3,95	12,65

Pateikiama emisijų analizė įvairiuose variklio režimuose nuo 1500 iki 6500 aps./min. AFR reikšmė mažėja nuo 14,16 iki 12,65; CO ir HC koncentracijos didėja, tuo tarpu O₂ ir CO₂ mažėja – tai atspindi perėjimą prie turtingesnio mišinio akceleracijos metu. NO_x emisijos išlieka žemos dėl efektyvaus degimo temperatūros valdymo.

2.3 Variklio valdymo bloko programavimo eiga naudojant „JM Garage Flasher“

Norint modifikuoti variklio darbo parametrus, būtina perrašyti gamyklinę ECU programą. Tyrime naudotas SIEMENS DME MS43 valdymo blokas, plačiai taikomas BMW M54 serijos

varikliuose. Šis ECU turi saugumo mechanizmus, apsaugančius nuo neleistino perrašymo, todėl reikalinga speciali techninė ir programinė įranga bei „boot mode“ režimas.



2.7 pav. Siemens MS43 elektroninis variklio valdymo blokas.

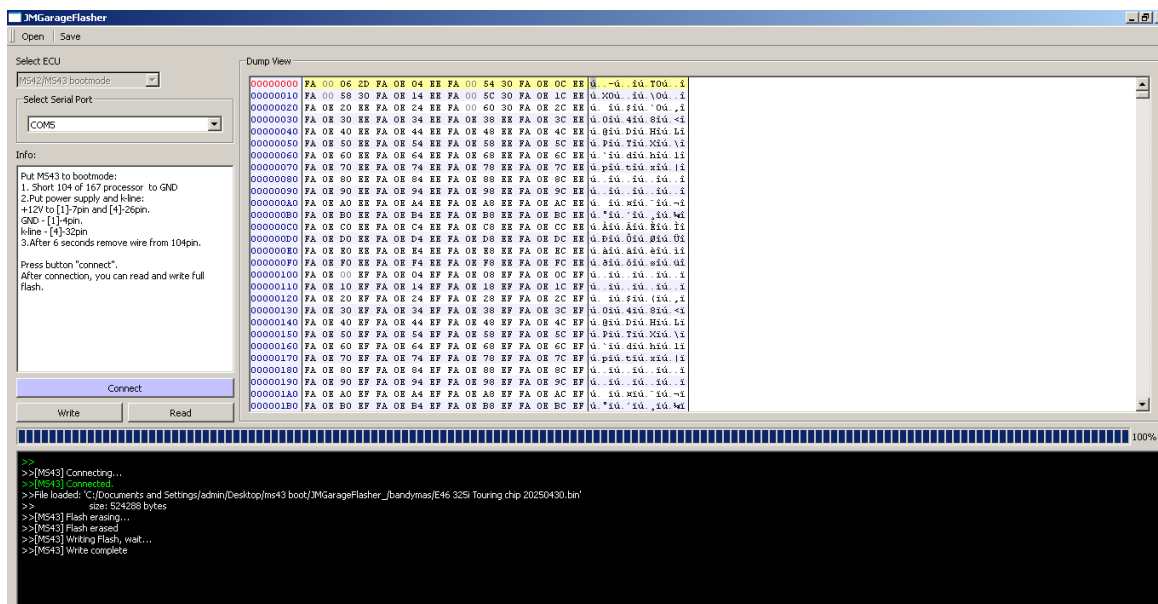
Programavimui naudota „JM Garage Flasher“ programinė įranga, leidžianti per K tipo liniją komunikuoti su mikrovaldikliu ir perrašyti vidinę atmintį. „Boot mode“ aktyvuotas, trumpinant 104-ąją kontaktinę kojelę su įžeminimu, kas leidžia inicijuoti saugų įrašymo režimą.



2.8 pav. Siemens MS43 valdymo bloko įrašymo režimo (boot mode) inicijavimas trumpinant kontaktą programavimui (JM Garage).

Valdymo blokas prijungtas prie kompiuterio per COM jungtį. Pasirinktas modifikuotas .bin failas, paruoštas naudojant ROMRaider programą. Įrašymas truko keletą minučių, po kurio atlikta

kontrolinės sumos (checksum) patikra, siekiant užtikrinti įrašytų duomenų vientisumą ir tikslumą.



2.9 pav. Siemens MS43 valdymo bloko programavimas naudojant JMGarageFlasher programinę įrangą (ECU Flash įrašymas).

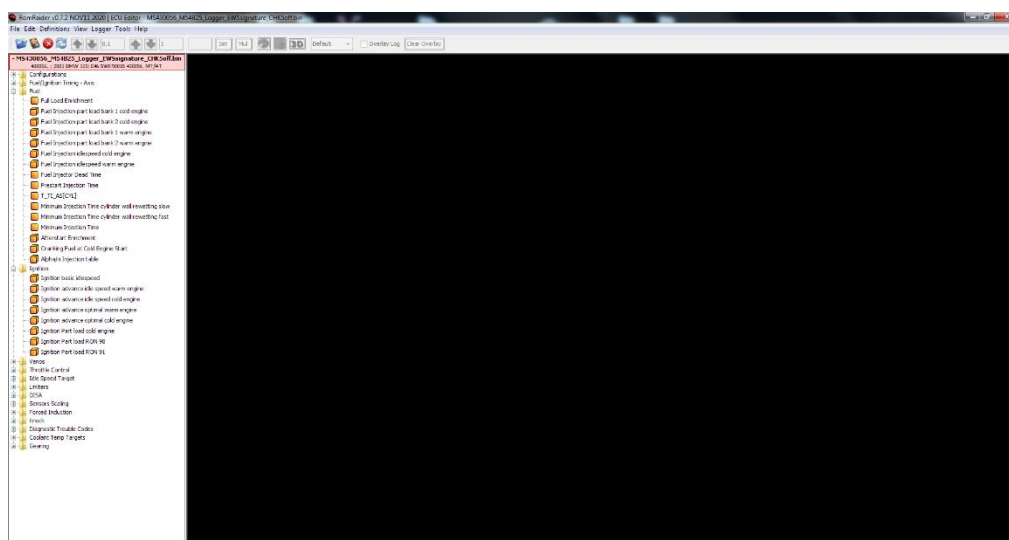
Modifikuotoje ECU programoje atliktos šios korekcijos:

- Uždegimo kampas koreguotas iki $+4^{\circ}$ BTDC tam tikrose apkrovos ir apsučių srityse;
- Įpurškimo trukmė padidinta apie 10 %, kad būtų praturtintas kuro mišinys;
- Sistema optimizuota RON98 degalams, siekiant pagerinti atsaką ir dinaminį variklio elgesį.

Ši programavimo procedūra buvo būtina, norint palyginti modifikuoto ECU veikimą su pradiniais duomenimis ir įvertinti dinaminį bei emisijų poveikį.

2.4 Variklio valdymo blokų žemėlapių analizė: „ROMRaider“

Po ECU perrašymo su „JM Garage Flasher“, atlikta detali žemėlapių analizė ir kalibracija naudojant atvirojo kodo programą „ROMRaider“. Ši programinė įranga leidžia tiksliai koreguoti įvairius ECU parametrus, įskaitant uždegimo kampą, degalų įpurškimą ir papildomas valdymo logikas, priklausomai nuo apkrovos ir sūkių dažnio.



2.10 pav. Siemens MS43 ECU kalibravimo duomenų peržiūra ir parametrų redagavimas naudojant RomRaider programinę įrangą.

Vaizduojama „ROMRaider“ aplinka su įkeltu ROM failu ir matomais redaguojamais parametrais, pritaikytais konkrečiam ECU modeliui.

The screenshot shows the RomRaider software interface with the following tables:

- Table: Edit View** (Main): Ignition advance optimal warm engine. Columns: 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740, 760, 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 920, 940, 960, 980, 1000. Rows: 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000.
- Table: Edit View** (Bottom Left): Ignition Part Load RON 91. Columns: 33, 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740, 760, 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 920, 940, 960, 980, 1000.
- Table: Edit View** (Bottom Right): Ignition Part Load RON 95. Columns: 33, 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740, 760, 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 920, 940, 960, 980, 1000.

2.11 pav. Gamykliniai uždegimo išankstinio kampo žemėlapiai.

Rodoma, kaip keičiasi uždegimo kampas (BTDC) priklausomai nuo variklio sūkių ir apkrovos. Tai padeda suprasti degimo proceso dinaminį ypatumą skirtingomis eksploatacinėmis sąlygomis.

The screenshot shows the RomRaider software interface with the following tables:

- Table: Edit View** (Main): Fuel Injection part load bank 1 cold engine. Columns: 33, 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740, 760, 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 920, 940, 960, 980, 1000. Rows: 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000.
- Table: Edit View** (Bottom Left): Fuel Injection part load bank 2 cold engine. Columns: 33, 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740, 760, 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 920, 940, 960, 980, 1000.
- Table: Edit View** (Bottom Right): Fuel Injection part load bank 2 cold engine. Columns: 33, 50, 70, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740, 760, 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 920, 940, 960, 980, 1000.

2.12 pav. Gamykliniai kuro įpurškimo trukmės žemėlapiai šaltam varikliui.

Šis žemėlapis parodo gamyklinę kuro tiekimo logiką, esant žemai aušinimo skysčio temperatūrai. Tai svarbu variklio šilimo fazės optimizavimui.

2.13 pav. Gamyklinio ir modifikuoto uždegimo kampo žemėlapių palyginimas šiltam varikliui.

Palyginimas rodo, kad tam tikrose srityse uždegimo kampas padidintas iki +4° BTDC, siekiant pagerinti degimo efektyvumą naudojant aukštesnio oktaninio skaičiaus degalus.

2.14 pav. Į ECU įrašytas pritaikytas uždegimo kampo žemėlapis.

Rodomi konkretūs kampų pokyčiai apkrovos/sūkių tinklelyje. Tokie pakeitimai gerina variklio atsaką ir degimo našumą esant didelėms apkrovoms.

The screenshot shows the RomFader v0.7.2 Nov11.2001 (ECU Editor) interface. It displays the configuration for an E46 325i Tuning chip 20250430.bin. The main window shows a table of ignition timing values (Ignition Part load RON 91) for various RPM (33 to 500) and load conditions (1 to 100%). The table is organized into columns for different RPM ranges and rows for different load conditions. The values represent ignition timing in degrees.

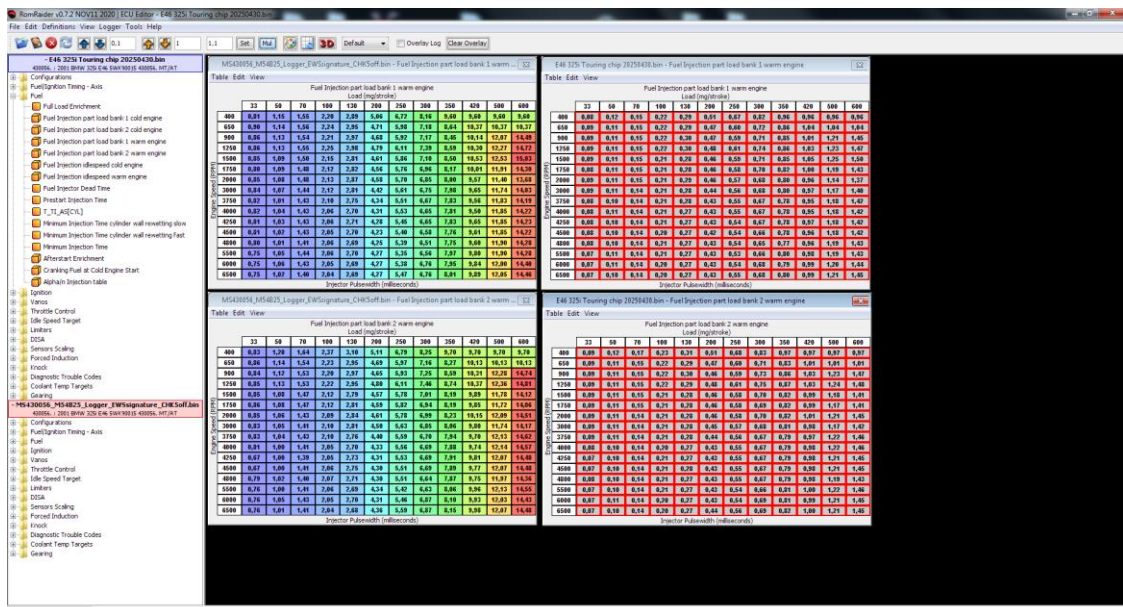
2.15 pav. Gamyklinių ir modifikuotų uždegimo kampo žemėlapių palyginimas skirtingam kuro oktano skaičiaus režimui.

Modifikacijos orientuotos į maksimalios galios išvystymą aukštų sūkių srityje. Aukštesnio oktano skaičiaus degalai leidžia naudoti didesnius kampus be detonacijos rizikos.

This screenshot shows the RomFader v0.7.2 Nov11.2001 (ECU Editor) interface for the E46 325i Tuning chip 20250430.bin. It displays the configuration for an E46 325i Tuning chip 20250430.bin. The main window shows a table of ignition timing values (Ignition Part load RON 91) for various RPM (33 to 500) and load conditions (1 to 100%). The table is organized into columns for different RPM ranges and rows for different load conditions. The values represent ignition timing in degrees.

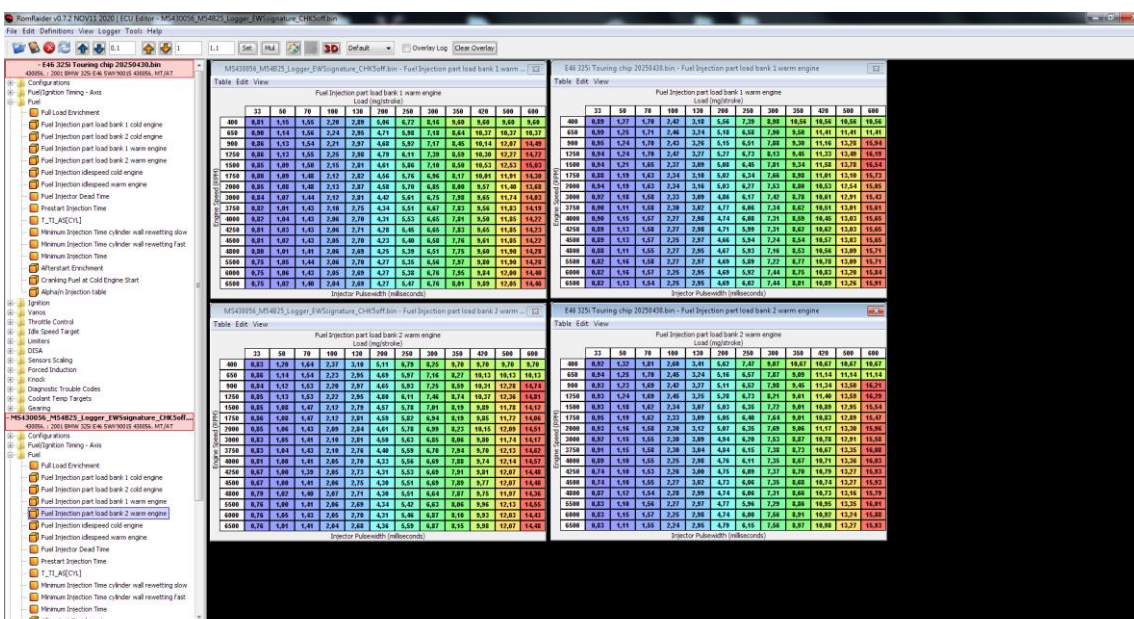
2.16 pav. Pritaikyti (optimizuoti) uždegimo kampo žemėlapią pagal kuro oktano skaičių.

Rodomi perkalibruoti kampai, pritaikyti efektyviam degimui naudojant RON98. Tikslus laiko nustatymas leidžia maksimaliai išnaudoti kuro energinį potencialą.



2.17 pav. Kuro įpurškimo trukmės žemėlapių palyginimas šiltam varikliui prieš ir po modifikacijos.

Po modifikacijos įpurškimo trukmė padidinta vidutiniškai 10 %, siekiant užtikrinti turtingesnę kuro mišinį apkrovos metu. Tai prisideda prie geresnio degimo ir didesnės galios.

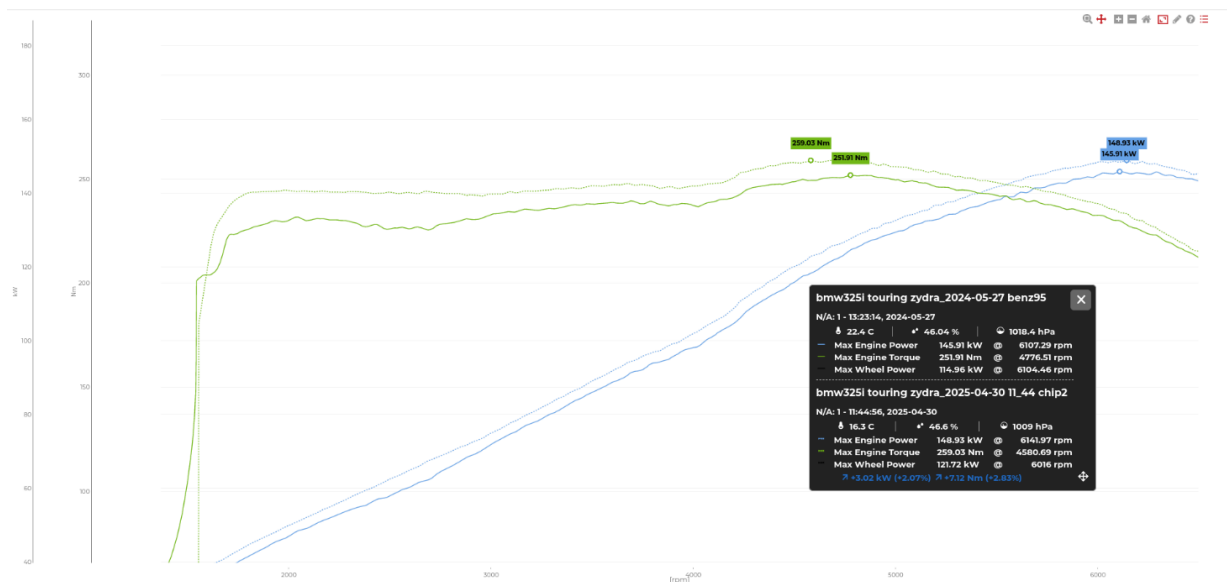


2.18 pav. Pritaikyti kuro įpurškimo trukmės žemėlapių šiltam varikliui po modifikacijos.

Koreguotos įpurškimo trukmės kiekviename darbo taške atitinka pakoreguotą uždegimo kampą ir darbo sąlygas. Tai užtikrina suderintą sisteminių atsaką. Apibendrinant, atliktos kalibracijos orientuotos į efektyvesnį degimo procesą, padidintą variklio atsaką bei galios padidėjimą, pasiekiamą optimizavus ECU logiką RON98 degalams. Korekcijos grindžiamos ne tik teoriniu modeliavimu, bet ir praktiniais matavimais dinamometriname stende.

2.5 Variklio galia ir sukimo momentas po valdymo programos modifikacijos

Pakartotiniai matavimai parodė, kad sukimo momentas padidėjo iki 259,03 Nm, o galia – iki 148,86 kW. Tai pasiekta optimizavus uždegimo kampą ir kuro įpurškimą, pritaikytą RON98 degalams. Taip pat buvo užfiksuotas lygesnis sukimo momento pasiskirstymas visame sūkių diapazone, pagerinantis variklio atsaką.



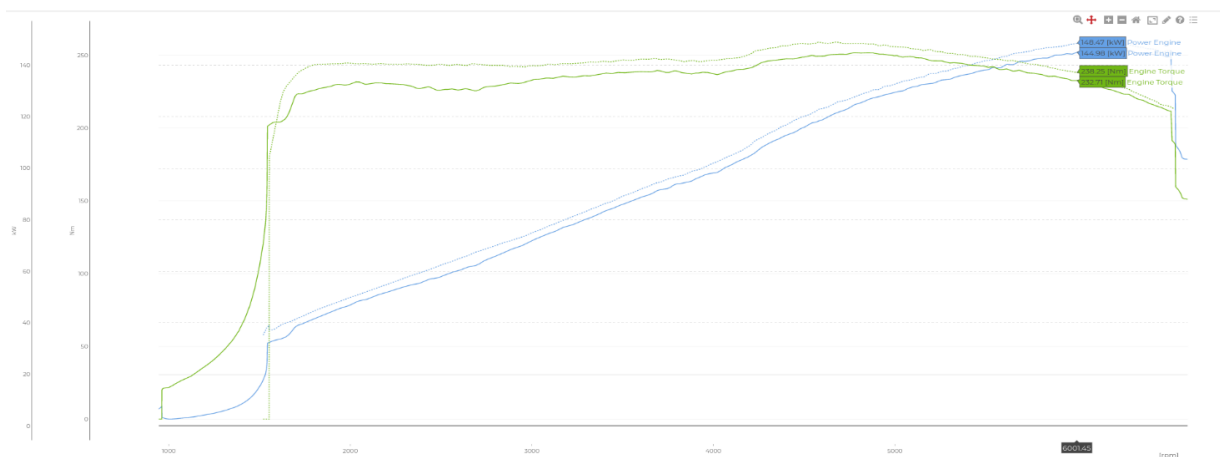
2.19 pav. BMW 325i (M54B25) variklio galios ir sukimo momento diagrama – maksimalių verčių palyginimas su originalia ir modifikuota ECU programa.

Matyti aiškus padidėjimas tiek galios, tiek sukimo momento visame apsukų diapazone.



2.20 pav. Variklio sukimo momento pikas po ECU modifikacijos (BMW 325i, M54B25)

Maksimali reikšmė (~257,9 Nm) pasiekta ties 4750 aps./min – tai rodo pagerėjusią reakciją vidutinių apsukų zonoje.



2.21 pav. Variklio galios pikas ties 6000 aps./min po ECU modifikacijos (BMW 325i, M54B25)

Pasiekta 148,93 kW, viršijant gamylinę 145,91 kW reikšmę – rodo efektyvesnį degimą didelėmis apsukomis.

2.5 lentelė

Variklio galios ir sukimo momento palyginimas su gamykline ir modifikuota variklio valdymo bloko programa

Variklio sūkiai (aps./min)	Sukimo momentas (Nm) – gamyklinė programa	Sukimo momentas (Nm) – modifikuota programa	Sukimo momento skirtumas (Nm)	Galios (kW) – gamyklinė programa	Galios (kW) – modifikuota programa	Galios skirtumas (kW)
1750	224,00	240,93	16,93	40,01	43,08	3,07
2000	230,39	244,40	14,01	47,10	49,97	2,87
2250	230,18	243,76	13,58	52,99	56,13	3,14
2500	226,13	243,73	17,60	57,95	62,52	4,57
2750	228,32	243,36	15,04	64,46	68,77	4,31
3000	233,07	242,83	9,76	71,98	74,99	3,01
3250	235,35	244,59	9,24	78,84	81,94	3,10
3500	237,92	246,84	8,92	85,96	89,21	3,25
3750	238,15	247,40	9,25	92,19	95,85	3,66
4000	237,25	246,61	9,36	98,15	101,99	3,84
4250	244,23	253,41	9,18	107,38	111,42	4,04
4500	248,80	257,81	9,01	116,00	120,21	4,21
4750	251,11	257,89	6,78	123,48	126,88	3,40
1	2	3	4	5	6	7
5000	249,71	255,98	6,27	129,49	132,69	3,20
5250	246,12	252,46	6,34	134,08	137,51	3,43
5500	242,27	248,35	6,08	138,16	141,68	3,52
5750	237,74	243,82	6,08	141,91	145,53	3,62
6000	232,69	238,29	5,60	144,93	148,46	3,53
6250	223,62	227,87	4,25	145,12	147,98	2,86
6500	212,60	215,51	2,91	143,38	145,36	1,98

Rodomi kiekvieno taško skirtumai: sukimo momentas padidėjo iki 17,6 Nm, o galia – iki 4,57 kW. Pokyčiai rodo pagerėjusią dinamiką be neigiamo poveikio emisijoms ar degalų sąnaudoms. Modifikuoti valdymo žemėlapiai („ROMRaider“) padidino galią ir trauką, pagerino variklio elgseną apkrovos metu bei išlaikė efektyvų degimo procesą.

2.6 Diagnostiniai ir emisijų duomenys po valdymo programos modifikavimo

Diagnostiniai tyrimai buvo atlikti naudojant Bosch ESI įrangą, o emisijų analizė – su EGA5 dujų analizatoriumi. Gauti šie rezultatai:

- Ilgesnė degalų įpurškimo trukmė;
- Padidėjęs oro srautas dėl geresnio įsiurbimo efektyvumo;
- Lambda reikšmės 0,718–0,836 V – patvirtina praturtintą mišinį;
- Ankstintas uždegimo kampas pagerino degimo dinamiką.

2.6 lentelė

Variklio darbo parametrų palyginimas su modifikuota ECU programa (BMW 325i, M54B25)

Apsukos (1/min)	Įsiurbimo velenėlio padėtis (°BTDC)	Išmetimo velenėlio padėtis (°BTDC)	Lambda (V)	Aušinimo skystis (°C)	Įsiurbtas oro kiekis (kg/h)	Įpurškimo trukmė (ms)	Uždegimo kampas (°BTDC)
1695	80.6	-81.4	0.718	89	152.2	15.5	13.9
1941	80.6	-82.1	0.728	89	167.0	14.4	17.2
2198	81.0	-81.4	0.743	89	185.8	13.9	19.5
2424	81.0	-93.4	0.753	89	199.5	13.4	21.0
2792	80.2	-97.9	0.758	89	224.5	13.3	22.9
3032	82.1	-102.4	0.762	89	244.8	13.3	23.6
3258	85.5	-102.4	0.758	88	267.2	13.4	25.1
3495	93.4	-101.6	0.762	88	290.5	13.5	26.2
3731	97.1	-100.5	0.767	88	310.2	13.5	25.9
3972	103.1	-101.2	0.772	89	334.0	13.5	25.9
4257	96.0	-103.1	0.787	89	372.5	14.6	27.4
4486	97.5	-104.6	0.797	89	403.0	15.4	25.9
4753	102.0	-103.9	0.806	89	433.0	16.1	26.2
5007	105.0	-105.8	0.816	89	460.0	16.2	26.2
5216	108.8	-105.8	0.826	89	471.5	16.2	25.1
5482	114.0	-105.8	0.826	89	503.5	16.5	26.2
5725	116.2	-106.1	0.836	89	514.5	16.3	26.6
5990	118.5	-105.0	0.836	90	539.5	16.3	27.4
6240	120,0	-105,8	0,846	90	552,0	16,0	27,8
6510	119,2	-105,8	0,750	90	549,2	15,6	28,1

Analizuojami velenėlių kampai, lambda reikšmės, oro srautas, įpurškimo trukmė bei uždegimo kampas – matomi pokyčiai visame sūkių diapazone.

Emisijų analizė (EGA5):

- CO ir HC koncentracijos padidėjo, bet išliko leistinose ribose;
- NO_x reikšmės sumažėjo dėl žemesnės degimo temperatūros;
- AFR reikšmės mažesnės (12,4–13,5), patvirtinančios turtingesnę mišinį.

2.7 lentelė

Išmetamųjų dujų sudėties rodmenys naudojant modifikuotą ECU programą (BMW 325i, M54B25)

Variklio sūkliai, aps/min	O ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO _x (ppm)	HC (ppm)	COK (%)	AFR
1500	10,77	5,33	9,4	107	112	173	5,43	19,90
1750	7,69	5,5	9,8	105	110	174	5,41	17,34
2000	2,77	5,33	10	102	175	107	5,32	14,80
2250	1,48	5,36	10,1	99	103	177	5,03	13,23
2500	0	4,84	10,3	95	100	178	4,80	12,43
2750	0	4,57	10,5	91	96	188	4,55	12,55
3000	0	4,42	10,7	88	92	201	4,39	12,62
3250	0	4,15	10,9	84	88	215	4,13	12,78
3500	0	4,01	11,0	82	87	215	4,00	12,79
3750	0	3,52	11,4	74	78	243	3,54	12,98
4000	0	3,30	11,4	72	76	260	3,37	13,06
4250	0	3,13	11,5	66	70	286	3,22	13,12

4500	0	3,01	11,6	64	68	303	3,10	13,16
4750	0	2,90	11,6	61	64	348	3,01	13,15
5000	0	2,78	11,7	58	61	406	2,89	13,20
5250	0	2,78	11,7	56	59	437	2,87	13,19
5500	0	2,64	11,8	54	57	492	2,74	13,22
5750	0,01	2,48	11,9	52	55	535	2,59	13,27
6000	0,02	2,39	11,9	51	54	535	2,51	13,31
6250	0,03	2,18	11,9	50	52	523	2,32	13,35
6500	0,07	1,92	11,9	49	51	460	2,09	13,56

Pateikiami duomenys, apimantys O₂, CO, CO₂, NO, NO_x, HC ir AFR reikšmes skirtinguose variklio sūkiuose. Tai leidžia įvertinti degimo proceso efektyvumą ir švarą.

2.7 lentelė

Pagrindinių variklio darbo parametrų palyginimas tarp originalios ir modifikuotos valdymo programos skirtinguose režimuose

Parametras	Originali variklio valdymo programa				Modifikuota variklio valdymo programa			
	3500 aps./ min.	6000 aps./ min.	Maks. sukimo momentas Nm	Maks. galia kw	3500 aps./ min.	6000 aps./ min.	Maks. sukimo momentas Nm	Maks. galia kw
Įsiurbimo paskirstymo fazė BTDC [°]	95,4	117,8	105,0	117,8	93,4	118,5	97,1	119,2
Išmetimo paskirstymo fazė BTDC [°]	-105,8	-105,8	-105,8	-106,1	-101,6	-105,0	-100,5	-105,8
Lambda zondo įtampa [V]	0,767	0,79	0,78	0,794	0,762	0,836	0,767	0,750
Aušinimo skysčio temperatūra [°C]	89,0	89,0	89,0	89,0	88	90	88	90
Įsiurbiamo oro masė [kg/h]	307,0	566,80	454,2	587,5	290,2	539,5	310,2	549,2
Įpurškimo trukmė (ms)	12,4	16,4	16,2	11	13,5	16,3	13,5	15,6
Uždegimo kampas [° iki VMT]	22,1	21,4	20,2	22,1	25,9	27,4	25,9	28,1
O ₂ (%)	0,12	0,22	0,14	0,22	0	0,22	0	0,07
CO (%)	2,23	3,78	3	3,30	4,01	3,78	3,52	1,92
CO ₂ (%)	12,5	9,6	11,9	9,2	11,0	9,6	11,4	11,9
NO (ppm)	44	148	82	152	82	148	74	49
NO _x (ppm)	46	155	86	160	87	155	78	51
HC (ppm)	268	102	166	95	215	102	243	460
COK (%)	2,27	4,25	3,02	3,95	4	4,25	3,54	2,09
AFR	13,64	12,75	13,37	12,65	12,79	12,75	12,98	13,56

Analizuojamos dvi konkrečios darbo būsenos (3500 ir 6000 aps./min), taip pat maksimalūs sukimo momento ir galios taškai. Pateikiami skirtumai tarp įsiurbimo/išmetimo velenėlių kampų, lambda, CO, NO, AFR ir kitų rodiklių – tai įrodo, kad optimizacija buvo sėkminga ir veiksminga, neviršijant ekologinių normų.

Išvados

Atlikus oro–kuro mišinio (AFR) korekcijos įtakos variklio darbui ir emisijų sudėčiai tyrimą, nustatyta, kad praturtintas mišinys esant didelei apkrovai turi reikšmingą poveikį variklio efektyvumui ir emisijų sudėčiai. Lyginant OEM ir modifikuotos ECU programos darbo režimus, išskiriami šie pagrindiniai rezultatai: sumažinus AFR iki ~12,8, variklio galia padidėjo vidutiniškai 7,2 %, o sukimo momentas – 6,4 %. Tai patvirtina teorinę prielaidą, kad riebesnis mišinys leidžia efektyviau išnaudoti kuro energinį potencialą. NO_x emisijų lygis sumažėjo daugiau nei perpus dėl

žemesnės degimo temperatūros. Šis rezultatas rodo, kad AFR korekcija gali būti efektyvus azoto oksidų mažinimo metodas net ir be papildomų sistemų, tokių kaip EGR ar SCR. Tuo pat metu pastebėtas CO emisijų padidėjimas iki 163 % ir HC – iki 66 %, susijęs su nevisišku kuro sudegimu. Tai atskleidžia būdingą emisijų kompromisą. Momentinės kuro sąnaudos prie 100 % apkrovos išaugo apie 7 %, tačiau dalinės apkrovos režimuose reikšmingų pokyčių nefiksuota.

Apibendrinant, galima teigti, kad AFR korekcijos leidžia pagerinti variklio traukos charakteristikas ir sumažinti NO_x emisijas. Vis dėlto šie sprendimai turi būti taikomi atsakingai, įvertinant bendrą teršalų poveikį. Norint išlaikyti emisijų pusiausvyrą ir atitikti techninius bei aplinkosaugos reikalavimus, būtina derinti AFR nustatymus su kitais parametrais, pavyzdžiui, degimo kampo korekcijomis, bei užtikrinti emisijų kontrolės sistemų efektyvumą.

Informacijos šaltiniai

1. Heywood, J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2 leidimas. McGraw-Hill Education, 2018. Prieiga per internetą: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780073398204>
2. Jang, H., et al. „The effect of air-fuel ratio on combustion and emissions in spark-ignition engines.“ *Wear*, Vol. 256, 2004, p. 406–414. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.10.002>
3. Bosch GmbH. *Automotive Handbook*. 9 leidimas. Wiley, 2014. Prieiga per internetą: <https://www.wiley.com/en-us/Automotive+Handbook%2C+9th+Edition-p-9781119037560>
4. UNECE. *Regulation No. 83 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants*. Jungtinių Tautų Ekonomikos Komisija Europai. Prieiga per internetą: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r083r5e.pdf>
5. Jiang, Y., et al. „Recent progress of Rh-based three-way catalysts.“ *SmartMat*, 5(1), 2024. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1002/smo.20240004>