

Optimizacija upravljanja radom motora kod nasumičnog isključivanja cilindara

Kurtoić, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:506590>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-12**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Kurtoić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc. Dr. sc. Momir Sjerić

Student:
Martin Kurtoić

Zagreb, 2020

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se navedenom literaturom te stečenim znanjem na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zahvaljujem se svom mentor doc. dr. sc. Momiru Sjeriću na pomoći, korisnim savjetima i strpljenju prilikom pisanja ovog završnog rada.

Također, zahvalio bih svojoj majci Ljiljani, ocu Damiru, bratu Matiji, sestri Ivi i baki Milki na moralnoj i financijskoj podršci, potpori i razumjevanju tokom trajanja preddiplomskog studija.

Konačno, zahvaljujem se svim profesorima, kolegama i prijateljima koji su mi olakšali i uljepšali studiranje.

Zagreb, rujan 2020.

Martin Kurtoić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Martin Kurtoić

Mat. br.: 0035204275

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija upravljanja radom motora kod nasumičnog isključivanja cilindara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of Engine Management with the Random Cylinder Deactivation Technology**

Opis zadatka:

Sustav nasumičnog isključivanja cilindara predstavlja naprednu tehnologiju kojom se isključivanje pojedinih cilindara provodi na razini pojedinih ciklusa kod višecilindarskih motora, a isključivanje cilindara obavlja se potpunim zatvaranjem usisnih i ispušnih ventila na pojedinom cilindru. Kod smanjenja potrebe za snagom motora povećava se udio ciklusa motora koji nemaju izgaranje čime se radni ciklusi dovode u područje većeg opterećenja i većeg efektivnog stupnja djelovanja. Primjena ovakvih sustava doprinosi poboljšanju u potrošnji goriva, uz zadovoljavanje zahtjeva u pogledu buke, vibracija i odziva u radu motora.

U sklopu završnog rada potrebno je:

- Proučiti i opisati postojeći sustav za nasumično isključivanje cilindara.
- Odabrati višecilindarski Ottov motor i prikupiti podatke za izradu simulacijskog modela motora.
- Izračunati i izraditi topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva bez isključivanja cilindara korištenjem komercijalnog programskog paketa za simulaciju radnog ciklusa motora.
- Odrediti i izračunati minimalna opterećenja motora koja je moguće ostvariti nasumičnim isključivanjem cilindara, a bez prigušenja usisa.
- Odabrati nekoliko radnih točaka motora i napraviti raziobu energije za slučaj bez i s isključivanjem cilindara.
- Definirati strategiju upravljanja radom motora za ostvarivanje djelomičnih opterećenja uz kontrolu pojave detotantnog izgaranja, a s ciljem postizanja veće efikasnosti motora.
- Iznijeti zaključke o ostvarenim simulacijskim rezultatima i njihovoj usporedbi.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnoga rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Momir Sjerić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ..... | I |
| POPIS SLIKA..... | III |
| POPIS TABLICA | IV |
| POPIS OZNAKA..... | V |
| POPIS KRATICA..... | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMERY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. SUSTAV NASUMIČNOG ISKLJUČIVANJA CILINDARA | 2 |
| 2.1. Povijest sustava deaktivacije cilindra [1] | 2 |
| 2.2. Princip rada motora sa nasumičnim isključivanjem cilindra | 3 |
| 2.3. Karakteristike izgaranja kod primjenjenog DSF sustava | 5 |
| 2.4. Implementacija DSF sustava | 6 |
| 2.4.1. Konstrukcijski zahtjevi..... | 6 |
| 2.4.2. Mogućnost primjene na postojećim motorima | 6 |
| 2.5. Potencijal DSF-a u primjeni | 7 |
| 2.5.1. Ottovi motori | 7 |
| 2.5.2. Diesellovi motori | 8 |
| 3. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA I TOPOLOŠKOG DIJAGRAMA SPECIFIČNE POTROŠNJE | 9 |
| 3.1. AVL Boost [4] | 9 |
| 3.2. Odabir motora..... | 9 |
| 3.3. Specifikacije motora | 9 |
| 3.4. Simulacijski model..... | 13 |
| 3.5. Pregled rezultata simuliranja radnog područja motora | 14 |
| 4. MINIMALNA OPTEREĆENJA OSTVARIVA NASUMIČNIM ISKLJUČIVANJEM CILINDARA BEZ PRIGUŠAVANJA USISA | 17 |
| 4.1. Princip određivanja minimalnih opterećenja..... | 17 |
| 4.2. Prilagodba simulacijskog modela | 18 |
| 4.3. Rezultati simulacije..... | 21 |
| 5. RAZDIOBA ENERGIJE | 23 |

| | |
|---|----|
| 5.1. Razdioba energije kod normalnog rada motora i rada sa DSF sustavom | 23 |
| 6. STRATEGIJA UPRAVLJANJA RADOM MOTORA | 25 |
| 6.1. Definiranje područja efikasnosti DSF sustava..... | 25 |
| 6.2. Kontrola detonantnog izgaranja..... | 27 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 30 |
| PRILOZI..... | 33 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2.1. Tipična povijest rada rednog četverocilindrenog motora sa DSF tehnologijom | 3 |
| Slika 2.2. Tlak usisne grane | 5 |
| Slika 2.3. Normalizirana specifična potrošnja goriva | 7 |
| Slika 3.1. 2.0I FSI 4V motor | 10 |
| Slika 3.2. Ispušna grana motora..... | 11 |
| Slika 3.3. Dijagram snage i momenta | 11 |
| Slika 3.4. Dijagram podizaja usisnog i ispušnog ventila..... | 12 |
| Slika 3.5. Shema simulacijskog modela | 13 |
| Slika 3.6. Simulirane vrijednosti momenta | 14 |
| Slika 3.7. Simulirane vrijednosti snage | 15 |
| Slika 3.8. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva za VW 2.0I FSI motor | 16 |
| Slika 4.1. Moment mehaničkih gubitaka simuliranog motora..... | 17 |
| Slika 4.2. Shema simulacijskog modela prilagođenog radu motora sa DSF sustavom | 18 |
| Slika 4.3. Srednji efektivni tlak u pojedinim ciklusima | 19 |
| Slika 4.4. Promjena koeficijanta protoka po cilindrima kod gustoće paljenja $FD = 40\%$ | 20 |
| Slika 4.5. Efektivni moment za gustoće paljenja od $FD = 10\%$ do $FD = 90\%$ bez prigušenja usisa. | 22 |
| Slika 6.1. Topološki dijagram specifične efektivne potrošnje goriva DSF sustava | 25 |
| Slika 6.2. Relativno smanjenje specifične efektivne potrošnje goriva sa DSF-om. | 26 |
| Slika 6.3. Strategija upravljanja radom motora | 27 |
| Slika 6.4. Detonacija u cilindru Ottovog motora | 28 |
| Slika 6.5. Tlak u cilindru | 28 |
| Slika 6.6. Topografski dijagram oktanskog broja za rad motora sa DSF sustavom | 29 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 3.1. Specifikacije 2.0I FSI motora ugrađivanog u VW Golf 5 | 10 |
| Tablica 4.1. Vrijednosti gustoća paljenja za ostvarivanje praznog hoda bez prigušenja usisa | 21 |
| Tablica 5.1. Radne točke kod normalnog rada motora | 23 |
| Tablica 5.2. Razdioba toplinske energije u točki 1. | 24 |
| Tablica 5.3. razdioba toplinske energije u točki 2. | 24 |
| Tablica 5.4. Razdioba toplinske energije u točki 3. | 24 |
| Tablica 5.5. Razdioba toplinske energije u točki 4. | 24 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna Jedinica | Opis |
|-----------|-----------------|--|
| g_e | g/kWh | Specifična efektivna potrošnja goriva |
| H_d | MJ/kg | Donja ogrijevna vrijednost goriva |
| M_e | Nm | Efektivni moment motora |
| $m_{G,h}$ | kg/h | Satna masena potrošnja goriva |
| n | 1/min | Brzina vrtnje motora |
| p | Pa | Tlak u cilindru |
| P_e | kW | Snaga motora |
| Q_e | kW | Toplina pretvorena u efektivni rad |
| Q_{hl} | kW | Toplina odvedena hlađenjem motora |
| Q_m | kW | Toplina utrošena na mehaničke gubitke |
| Q_{isp} | kW | Toplina odvedena ispušnim plinovima |
| Q_{zr} | kW | Toplina odvedena zračenjem vrućih djelova motora |
| Q_1 | kW | Dovedena toplina |
| η_e | - | Efektivni stupanj djelovanja motora |

POPIS KRATICA

| Oznaka | Opis |
|---------------|--|
| NVH | eng. “ <i>Noise, vibration and harshness</i> ” |
| DSF | eng. “ <i>Dynamic skip fire</i> ” |
| DCCO | eng. “ <i>Deceleration cylinder cut-off</i> ” |
| DFCO | eng. “ <i>Deceleration fuel cut-off</i> ” |
| FF | eng. “ <i>Fireing frequency</i> ” |
| λ DSF | eng. “ <i>Lean DSF</i> ” |
| NEDC | eng. “ <i>New european driving cycle</i> ” |
| BMEP | eng. “ <i>Break mean efective pressure</i> ” |
| FD | eng. “ <i>Fireing density</i> ” |
| EI | eng. “ <i>Engine interface</i> ” |

SAŽETAK

Cilj ovog rada je bio simulacijski pokazati potencijal sustava nasumičnog isključivanja cilindara kod Ottovih motora. Prvenstveno je bilo potrebno odabrati Ottov motor na kojem će se bazirati simulacijski model. Nadalje je bilo potrebno kalibrirati komponente simulacijskog modela kako bi simulirani motor imao što sličniju radnu karakteristiku. Odrađena je obrada simulacijskih podataka kako bi se dobila specifična efektivna potrošnja goriva za normalan rad motora koja je kasnije korištena kao polazna točka za evaluaciju efikasnosti rada motora s DSF (eng. “*Dynamic skip fire*”) sustavom. Nakon simuliranja normalnog rada motora potrebno je bilo prilagoditi simulaciju za DSF način rada. Kontrolom različitih gustoća paljenja opisan je način rada motora u praznom hodu kada je isti opremljen DSF sustavom. Daljnji interes ovog rada nalazio se u analizi razdiobe energije kod normalnog rada motora i onog sa nasumičnim isključivanjem cilindara. Naposljetku se izvršilo definiranje strategije rada motora kod djelomičnih opterećenja sa ciljem postizanja minimalne potrošnje i maksimalne učinkovitosti uz opisivanje preventivnih mjera za sprječavanje detonantnog izgaranja.

Ključne riječi: simulacija Ottovog motora, nasumično isključivanje cilindara, energetska bilanca motora, strategija rada motora.

SUMMERY

Aim of this paper was to show dynamic skip fire system potential in Otto cycle engines. Firstly engine on which simulation model would be based had to be chosen. Next was calibration of all simulation components so simulated engine's working characteristic was as close as possible to the real engine. By analysing simulation data break specific fuel consumption for normal working engine was defined which would be used as starting point in evaluating the efficiency of DSF equipped engine. After simulation of normal working engine was complete, simulation had to be altered in such a way it could accommodate DSF technology. Engine working at idle load had been described by controlling firing density of cylinders. Further interest of this paper was distribution of thermal energy in normal working engine compared to DSF working engine. In the end engine control strategy was defined with emphasis on maximizing engine efficiency at partial loads alongside engine knock prevention strategy.

Key words: Otto engine simulation, dynamic skip fire, engine energy distribution, engine control strategy.

1. UVOD

Efikasnost rada motora je bitan aspekt razvoja motora sa unutarnjim izgaranjem. Organizacije koje propisuju regulativne norme za cestovna vozila poradi smanjenja emisije štetnih plinova konstantno izlaze sa sve strožim normama za čije nepoštivanje proizvođači automobila bivaju prisiljeni plaćati ogromne kazne. Zbog toga proizvođači motora sa unutarnjim izgaranjem su prisiljeni konstantno ulagati u istraživanje i razvoj svojih proizvoda. Jedne od novijih tehnologija koje bivaju ugrađivane u cestovna vozila su tehnologije koje se baziraju na isključivanju cilindara kod smanjenih opterećenja što efektivno daje kontrolu nad radnim volumenom motora. Prvi oblik ovakvog načina rada motora je bilo isključivanje već predodređenih cilindara. Sljedeći korak u razvoju tehnologije isključivanja cilindara predstavlja mogućnost isključivanja bilo kojeg cilindra u motoru pod djelomičnim opterećenjem. Isključivanjem određenih cilindara potražnja momenta se zadovoljava radom manjeg broja cilindara koji rade pod većim opterećenjima. Razlog iz kojega se teži ovakvom radu cilindara je taj što tada motor radi sa većim efektivnim stupnjem djelovanja. Dok tehnologija nasumičnog isključivanja pokazuje veliki potencijal, ona također zahtjeva vrlo kompleksne algoritme koji upravljaju s aktiviranjem ili deaktiviranjem cilindara. Ako upravljačko računalo nije adekvatno kalibrirano vibracije proizvedene ovakvim radom motora mogu narušiti kvalitetu udobnosti vozila i odziv motora.

2. SUSTAV NASUMIČNOG ISKLJUČIVANJA CILINDARA

2.1. Povijest sustava deaktivacije cilindara [1]

Uporaba selektivnog paljenja cilindara u svrhu reguliranja izlaznog momenta motora datira sa kraja 19. stoljeća kod jednocilindrenih masovno proizvedenih prijenosnih motora sa primjenom u agrokulturi i proizvodnim pogonima. Regulacijski mehanizam “pogodak” ili “promašaj” (eng. “hit or miss”) regulirao je koji ciklus je ciklus “pogodak”, a koji ciklus “promašaj” ovisno o traženom izlaznom momentu.

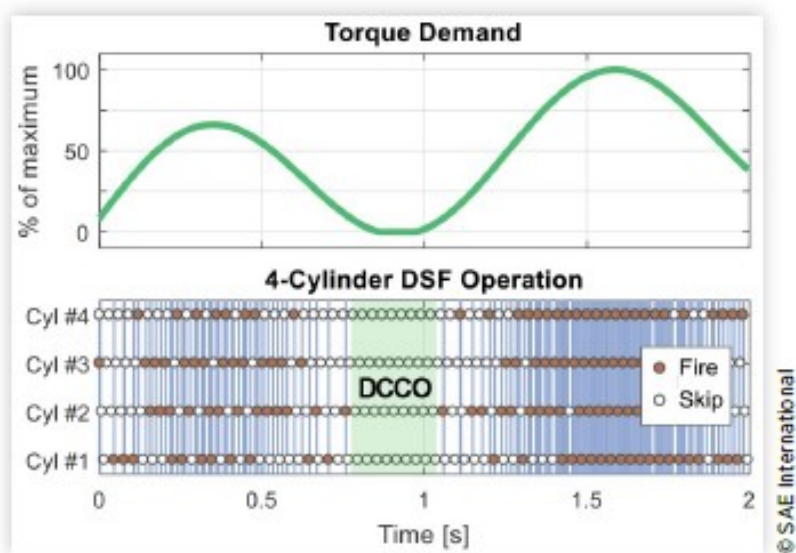
Prvi mehanizmi su bili kontrolirani mehaničkim regulatorima te je kasnije 1978. godine Fordova napredna divizija primjenila elektronički kontrolirani sustavi sa hidraulički deaktiviranim klackalicama. Cadillac je prvi 1981. godine predstavio komercijalni model sa elektronički upravljanom deaktivacijom cilindara te su do danas brojni proizvođači automobila prihvatili ovu tehnologiju i primjenili je na svoje modele. (Mitsubishi, DaimlerChrysler, General Motors, Mercedes, Audi, VW i dr.). Mitsubishi 1982. godine predstavlja 1.4L, četverocilindreni motor varijabilnog obujma gdje se prekida podizanje usisnih i ispušnih ventila hidrauličnim upravljanim klackalicama. DaimlerChrysler 2004. godine izlazi sa 5.7L Hemi V8 motorom opremljenim hidraulički deaktiviranim podizačima ventila na 4 cilindra. General Motors godinu kasnije (2005.) korištenjem slične tehnologije onaj DaimlerChrylera predstavlja 3.9L 60° V6 motor na kojem je mogućnost deaktiviranja cilindara postavljena na lijevi red cilindara (1-2-3). 2004. godine Honda izlazi sa 3.5L V6 motorom sa mogućnošću isključivanja četvrtog, petog i šestog cilindra. Zatim Audi predstavlja 2012. godine V8 motor sa varijabilnim profilom brijegova što je omogućilo, prema potrebi, rad sa 4 cilindra. Volkswagen 2013. izdaje četverocilindreni 1.4L TSI motor na kojem je primjenjena ista tehnologija kao kod Audija na 2. i 3. cilindru.

Zajednička karakteristika svih sustava deaktivacije cilindara primjenjenih u masovnoj proizvodnji se očituje u njihovoj tendenciji da izađu iz režima rada sa smanjenim brojem cilindara kada vozačeva potražnja snage nije trivijalnog oblika. Često je slučaj da je motor sposoban dati traženi moment sa smanjenim brojem cilindara no kontrolna jedinica odluči ne koristiti sustav deaktivacije pošto nije u stanju proizvesti isti iznos momenta sa različitim setovima cilindara.

Količina buke i vibracije (eng. “*Noise, vibration and harshness – NVH*”) su još jedan problem kod deaktiviranja cilindara pošto se isključivanjem određenih cilindara mogu proizvesti neugodne vibracije kod rada sa smanjenim brojem cilindara. Nadalje sam prijelaz iz jednog načina rada u drugi predstavlja određeni problem pošto je teško odrediti striktnu granicu kod koje se događa promjena načina rada kako bi prijelaz ostao neprimjetan.

2.2. Princip rada motora sa nasumičnim isključivanjem cilindara

Tehnologija nasumičnog isključivanja cilindara (eng. “*Dynamic skip fire – DSF*”) bazira se na paljenju ili preskakanju paljenja svakog pojedinog cilindra kako se pojavi prilika za ostvarivanjem izgaranja u svrhu postizanja traženog izlaznog momenta motora. Primjenom ove tehnologije kontrola izlaznog momenta motora proizlazi iz gustoće paljenja radije nego preko kuta otvorenosti zaklopke što smanjuje efektivni stupanj djelovanja motora. Na slici 2.1. prikazana je povijest paljenja cilindara (donji dijagram) u relativnom odnosu na potražnju momenta kao postotak od maksimalne vrijednosti (gornji dijagram).



Slika 2.1. Tipična povijest rada rednog četverocilindrenog motora sa DSF tehnologijom [2]

DSF tehnologija je primarno centrirana oko softvera integriranog u kontrolno računalo sa ciljem postizanja optimalnog redosljeda paljenja za minimalnu potrošnju uz zadovoljavanje NVH karakteristika traženih od strane proizvođača automobila. Smanjenje potrošnje očituje se u

smanjenju toplinskih gubitaka, povećanju efektivnog stupnja djelovanja te smanjenja trenja u razvodnom sustavu.

Motori opremljeni DSF tehnologijom mogu primjeniti deakceleracijsko deaktiviranje cilindara (eng. “*deceleration cylinder cut-off – DCCO*”) gdje su svi cilindri isključeni kao što je prikazano na slici 2.1. (prekinut dovod goriva uz prekid rada ventila). Radom motora sa DCCO zrak se ne prepumpava kroz motor kao u konvencionalnim sustavima deakceleracijskog prekida dotoka goriva (eng. “*deceleration fuel cut-off – DFCO*”) time smanjujući kočenje motora, produljivanje prekida dotoka goriva i poboljšava uvjete za pravilan rad katalitičkih konvertera.

Toplinski gubici izgaranja u cilindrima kod smanjenih opterećenja mogu postizati veće udjele u razdiobi ukupne energije, no kod DSF upravljanja izgaranje se odvija pod većim opterećenjem pojedinih cilindara što za posljedicu ima manji udio toplinskih gubitaka. Manipuliranjem izgaranja na ovaj način moguće je postizanje potpunijeg izgaranja u većem rasponu opterećenja. Potpunijim izgaranjem se postižu više temperature u ispušnoj grani, a samim time se poboljšava efikasnost trokomponentnih katalizatora što smanjuje količinu NO_x/HC plinova [1].

Deaktiviranjem komponenata razvodnog sustava pojedinih cilindara opterećenja u razvodnom sustavu se znatno smanjuju pogotovo na kontaktnim površinama brijegova i pratećih elemenata. Takvim isključivanjem klizno trenje postaje znatno manje zajedno sa trošenjem elemenata u kontaktu čime se dalje povećava učinkovitost cijelog sustava.

Kontroliranje NVH parametara primjenom DSF tehnologije se znatno olakšava pošto kontrolna jedinica motora ima potpunu kontrolu nad svakim događajem izgaranja, a time kontrolu nad frekvencijskim i zvučnim pobudama koje se šire cijelim vozilom. Moguće je dodavanje većeg broja parametara prema kojima se postiže mirniji, ugodniji i tiši rad, npr. ako postoji potreba za paljenjem cilindara čisto iz razloga zadovoljavanja NVH karakteristika moguće je prilagoditi upravljačke algoritme na taj način uz uvjet da zadovolji potražnja za izlazim momentom.

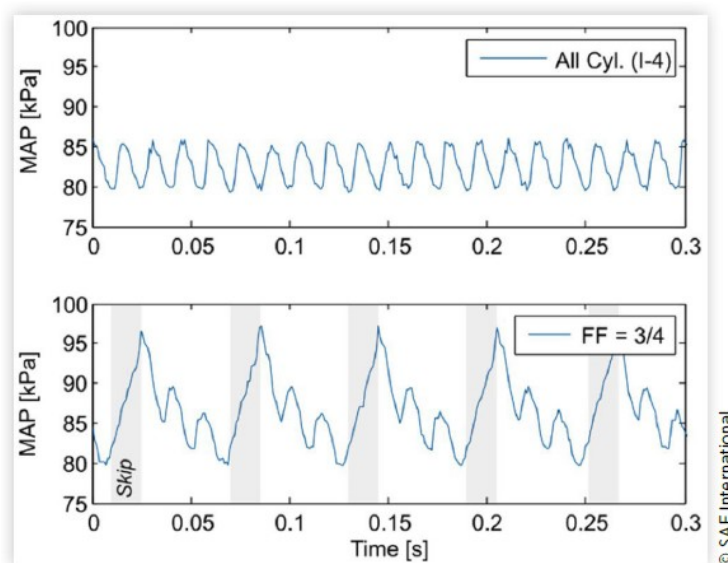
Nasumično isključivanje cilindara moguće je ostvariti samo sa prestankom dotoka goriva, no deaktivacijom ventila omogućuje se efektivan rad trokomponentnog katalizatora. Moderna hidraulična tehnologija isključivanja kakva je prethodno opisana nam to omogućuje. Iako bi samo

neki od cilindara bili opremljeni deaktivacijskim ventilima DSF tehnologija je i dalje primjenjiva samo uz skromnije krajnje rezultate smanjenja potrošnje te NVH karakteristika.

Jedna od ugrađenih prednosti DSF sustava u odnosu na trenutne komercijalne sustave deaktivacije određenih cilindara se očituje u jednolikom trošeljju i ravnomjernom termalnom opterećenju svih cilindara.

2.3. Karakteristike izgaranja kod primjenjenog DSF sustava

Efikasan rad motora predstavlja problem zbog nejednolike stvarne količine zraka koja se zarobi u cilindru nakon usisnog takta. Prekidom rada jednog cilindra zatvaraju se usisni i ispušni ventili. Kako kod normalnog rada motora usisni ventili svih cilindara rade u pravilnom razmaku, kada jedan od ventila ostane zatvoren (u trenutku kada se, u normalnom radu, od njega očekuje da bude otvoren) u usisnoj grani zrak zbog inercije i dalje struji prema cilindru. No pošto je usisni ventil isključenog cilindra zatvoren ne postoji otvor kroz koji bi taj svježi zrak ušao u komoru izgaranja, zbog toga raste tlak u usisnoj grani. Prvi sljedeći aktivni cilindar, zbog većeg tlaka u usisnoj grani, usisava veću količinu zraka (prikazano na slici 2.2.) Veća količina zarobljenog zraka diktira da je nakon deaktivacije cilindra potrebo korigirati količinu ubrizganog goriva u ostalim aktivnim cilindrima koji slijede kako bi se zadržao željeni omjer zraka i goriva.



Slika 2.2. Tlak usisne grane kod rada četverocilindrenog rednog motora sa svim cilindrima (gornji dijagram) i rada motora sa DSF-om uz frekvenciju paljenja $FF = 75\%$ (donji dijagram). [3]

2.4. Implementacija DSF sustava

2.4.1. Konstrukcijski zahtjevi

Glavni zahtjev koji se nameće na tehnologiju potrebnu za deaktivaciju cilindra je taj da ona mora omogućiti deaktiviranje cilindra u vremenu između svakog mogućeg događaja izgaranja te to mora obavljati krajnje pouzdano.

Poznate tehnologije deaktivacije cilindra, kako je prethodno prikazano u tekstu, koriste mehanizme na mehaničko-hidrauličkoj bazi gdje se pomoću solenoidnih hidrauličnih ventila pomiču elementi predopterećeni oprugama kako bi omogućili deaktivaciju elemenata razvodnog sustava. Kada se tlak u sustavu smanji opružni elementi vraćaju pozicijske elemente u funkcionalni položaj i time omogućavaju normalno funkcioniranje razvodnog sustava. Ovakvi sustavi su zbog svoje brzine više nego adekvatni za primjenu na motorima sa DSF tehnologijom.

Direktno ubrizgavanje predstavlja još jedan od mogućih oblika implementacije DSF tehnologije na postojeće motore pošto je cijeli DSF sustav računalno upravljan, potrebno je samo implementirati algoritme za provođenje nasumične deaktivacije cilindra kod smanjenih zahtjeva za izlazim momentom te koristiti isključivanje pojedinih injektora za deaktivaciju cilindra. Nadalje direktnim ubrizgavanjem je kod Otto motora moguće ostvarivati veće kompresijske omjere, omogućiti rad motora sa siromašnom smjesom te kompenzirati bilo kakve varijacije u trajanju deaktivacije cilindra.

2.4.2. Mogućnost primjene na postojećim motorima

Kroz blok motora je potrebno provesti dodatne uljne galerije koje bi dovodile hidraulični fluid u glavu motora. Glavu motora je potrebno prilagoditi za deaktivacijske elemente kao što su bregasta vratila sa varijabilnim profilom brijega, deaktivacijske klackalice/ poluklackalice, hidraulični podizači ili oslonci klackalica/ poluklackalica koji imaju mogućnost negiranja podizaja brijega.

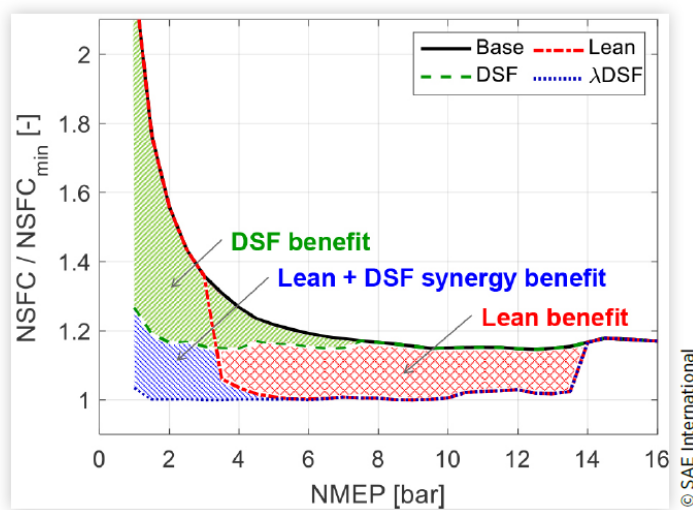
Dok za konstrukcije komponente već postoje primjenjiva rješenja, kontrolni dio DSF sustava traži ekstenzivan razvoj i usavršavanje kako bi se maksimizirali potencijali ove tehnologije po pitanju učinkovitosti, potrošnje goriva te NVH karakteristika. Optimiziranje kontrolnog algoritma se može provesti iterativnim postupcima dok se u novije vrijeme javlja mogućnost primjene strojnog učenja i umjetne inteligencija za brži razvoj uz kvalitetniji kontrolni algoritam kao izlazni proizvod.

Kako DSF sustav zahtjeva konstrukcijske izmjene u razvodnom sustavu te vrlo male izmjene u samom bloku motora zajedno sa razvojem kontrolnih modula implementacija ovakvog sustava je isplativija od razvijanja potpuno nove generacije motora.

2.5. Potencijal DSF-a u primjeni

2.5.1. Ottovi motori

Referenca [2] prikazuje potencijal primjene DSF tehnologije na motorima koji rade sa siromašnom smjesom (eng. " λ DSF – lean DSF"). Rad λ DSF-a u tandemu sa siromašnom smjesom omogućava pokrivanje većeg dijela radnog spektra motora. Slika 2.3. pokazuje područje primjene DSF-a, λ DSF i siromašne smjese. Možemo primjetiti da DSF i rad sa siromašnom smjesom nemogu pokriti cijelo područje rada motora te primjena λ DSF omogućava pokrivanje cijelog radnog spektra.



Slika 2.3. Normalizirana specifična potrošnja goriva kod 2000 o/min u 6. Stuplju prijenosa za stehiometričke i siromašne homogene četverocilindrene redne motore sa DSF načinima rada. [2]

Primjenom DSF tehnologije u NEDC ciklusu potrošnja goriva je manja za 6,7% dok uparivanjem DSF tehnologije sa siromašnom smjesom potrošnja goriva se smanjuje za 9,7%. [2]

2.5.2. Diesellovi motori

Dieselski motori do sada nisu biti uzeti u obzir kada je u pitanju tehnologija nasumičnog isključivanja cilindara no referenca [2] istražuje potencijalne pozitivne utjecaje koje bi primjena DSF tehnologije imala na diesel motore kod osobnih automobila te manjih industrijskih vozila.

Glavna prednost DSF tehnologije se nalazi u području smanjenog opterećenja. Prema [2] uzimanjem u obzir BMEP, gustoću paljenja te brzinu vrtnje motora smanjenje potrošnje se kreće od 2,8% (BMEP = 3 bar, FD = 0,5 i $n = 1000 \text{ min}^{-1}$) do 24% (BMEP = 3 bar, FD = 0,5, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$). Nametanjem efikasnije i potpunijeg izgaranja u diesel motorima povećava se i temperatura ispušnih plinova što za posljedicu ima smanjenje NOx emisija.

Kontroliranje gustoće izgaranja kod diesel motora je moguće ostvariti prekidom dotoka goriva u cilindar kojeg želimo isključiti što je moguće ostvariti ugradnjom elektronički upravljanih injektora te ugradnjim dodatne kontrolne jedinice sa algoritmima za nasumično isključivanje cilindara.

Kako dieselski motori imaju već ugrađen potencijal za isključivanje cilindara preko ubrizgavanja goriva implementacija ovakvog sustava bi bila relativno ekonomična pogotovo ako se u obzir uzmu prethono opisane beneficije.

3. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA I TOPOLOŠKOG DIJAGRAMA SPECIFIČNE POTROŠNJE

Za izradu simulacijskog modela te simuliranje radnog ciklusa motora korišten je komercijalni program AVL Boost 2013.2 austrijske kompanije AVL.

3.1. AVL Boost [4]

AVL Boost je potpuno integrirani softver za simulaciju motora sa unutarnjim izgaranjem. Omogućava simuliranje naprednih modela kojima precizno predviđa performanse motora, emisije ispušnih plinova te akustiku cijelog sustava.

3.2. Odabir motora

Kriteriji uzeti u obzir kod odabira Otto motora su bili: pristupačnost potrebnih podataka za izradu simulacijskog modela, mogućnost implementacije DSF sustava te pristupačnost podataka od strane proizvođača za usporedbu simulacijskih rezultata. Navedene kriterije je najbolje ispunio 2.0I FSI motor tvrtke Volkswagen.

3.3. Specifikacije motora

2.0I FSI motor Volkswagen grupacije je prvi puta predstavljen u Audijevom modelu A4 2003. godine te je zadnja iteracija ovog motora korištena u VW Eos 2015. godine. Simulacijski je model baziran na specifikacijama motora ugrađivanog u VW Golf 5 između 2003. i 2006. godine. Podaci navedeni u Tablici 1. su sakupljeni iz referenci [5], [6], [7] i [8].

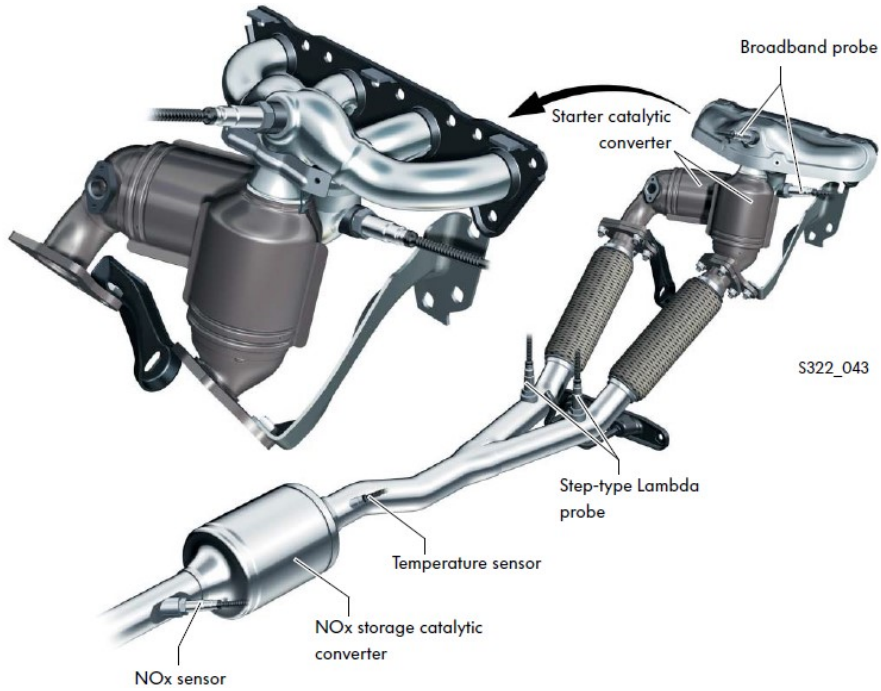


S322_015

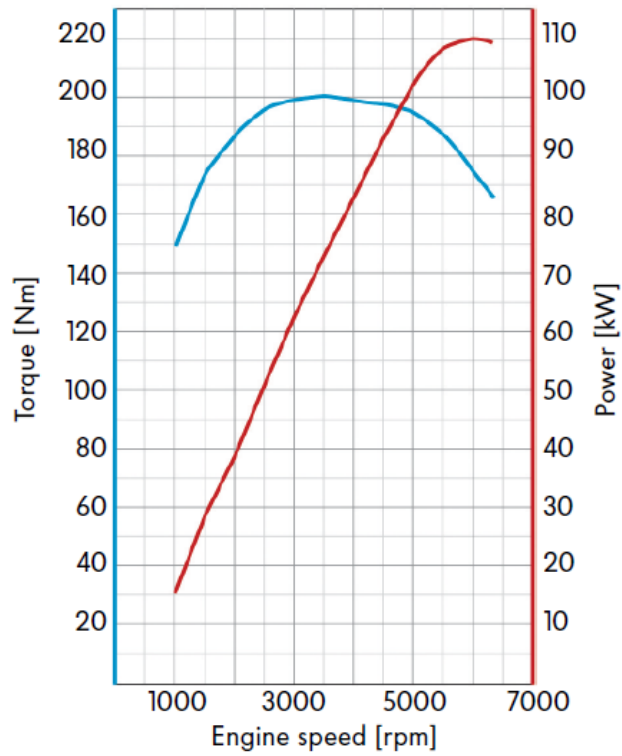
Slika 3.1. 2.0I FSI 4V motor [5]

Tablica 3.1. Specifikacije 2.0I FSI motora ugrađivanog u VW Golf 5

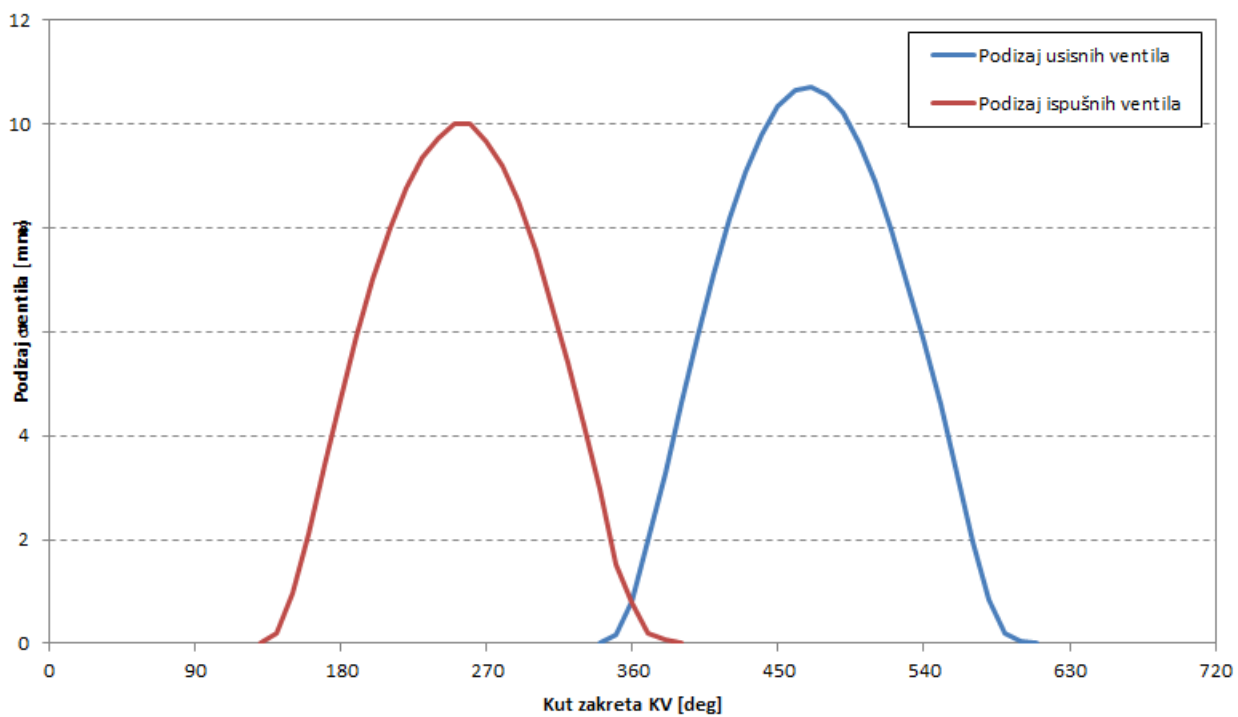
| | |
|---|-----------------------|
| Kod motora | AXW |
| Zapremnina motora [cm ³] | 1984 |
| Tip motora | Otto motor |
| Način ubrizgavanja goriva | Direktno ubrizgavanje |
| Hod cilindra [mm] | 92,8 |
| Promjer cilindra [mm] | 82,5 |
| Kompresijski omjer [-] | 11,5 |
| Duljina klipnjače [mm] | 144 |
| Broj ventila po cilindru [-] | 4 |
| Promjer usisnog ventila [mm] | 33,85 |
| Podizaj usisnog ventila [mm] | 10,7 |
| Promjer ispušnog ventila [mm] | 28 |
| Podizaj ispušnog ventila [mm] | 10 |
| Maksimalna snaga [kW @ min ⁻¹] | 110 @ 6000 |
| Maksimalni moment [Nm @ min ⁻¹] | 200 @ 3500 |
| Redosljed paljenja | 1-3-4-2 |
| Težina motora [kg] | 152 |



Slika 3.2. Ispušna grana motora [5]



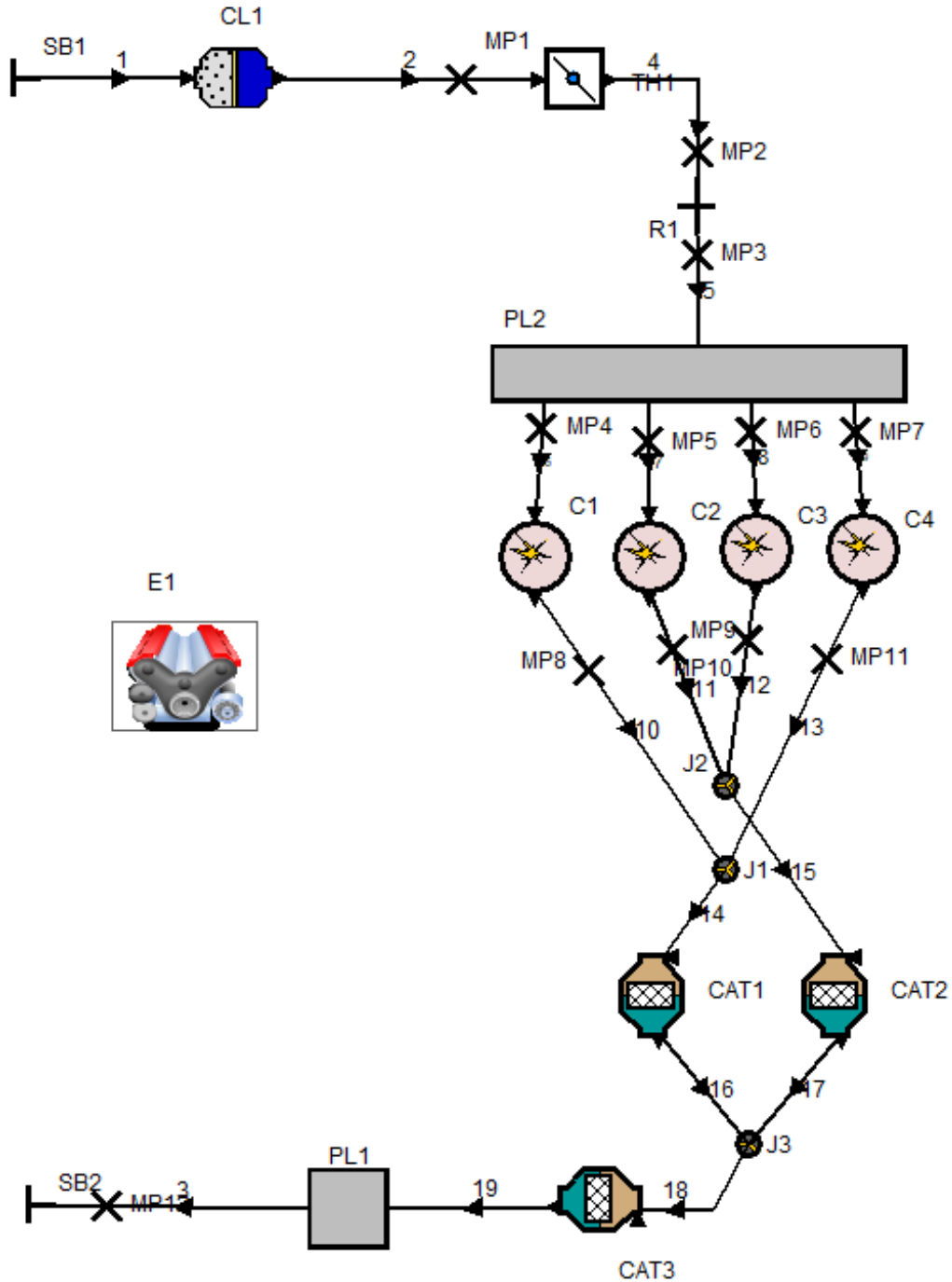
Slika 3.3. Dijagram snage i momenta [5]



Slika 3.4. Dijagram podizaja usisnog i ispušnog ventila

3.4. Simulacijski model

Korištenjem podataka navedenih u tablici 1. i reference [5] izrađen je simulacijski model čija je shema prikazana na slici 2.3.

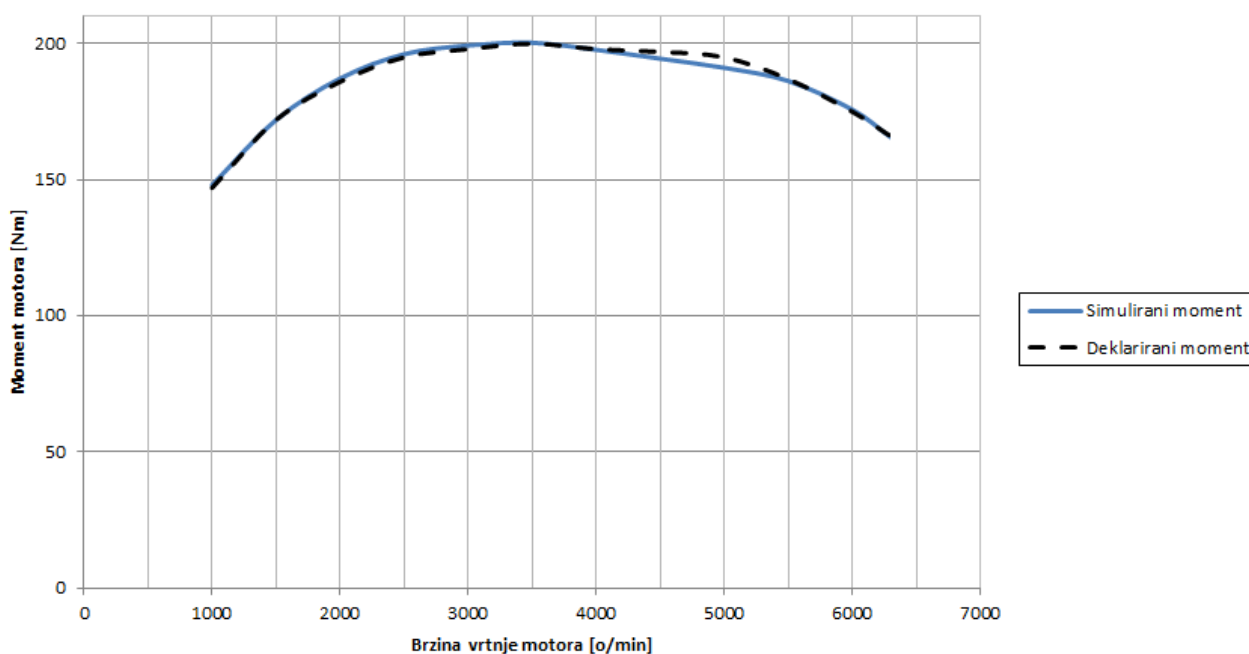


Slika 3.5. Shema simulacijskog modela

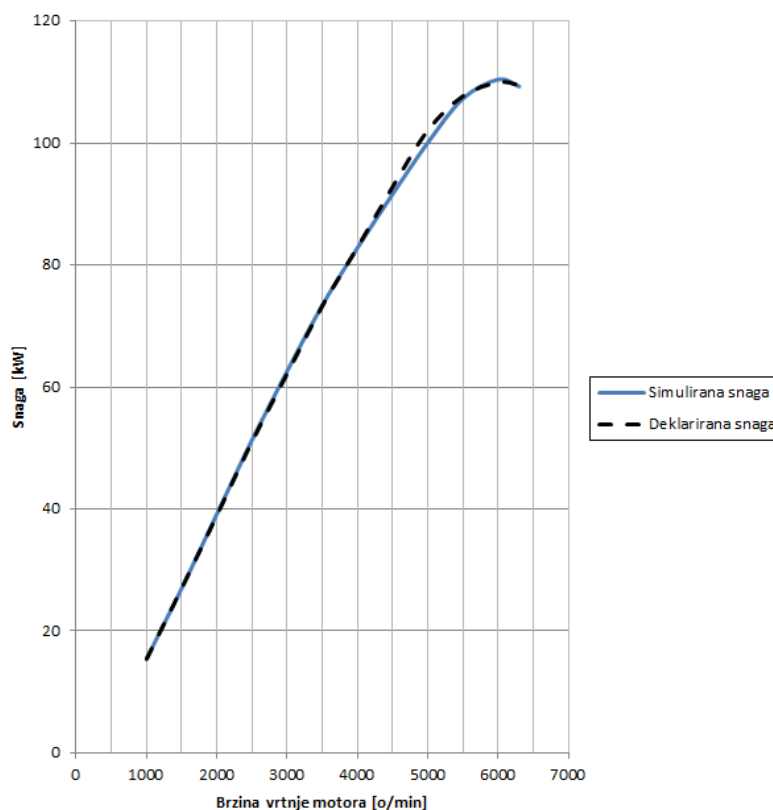
Simulacijski model se sastoji od svih bitnih komponenata motora navedenih u reference [5]. Uz postavljenje svih elemenata sheme potrebno je iterativnim postupkom odrediti duljine cijevi koje spajaju sve elemente kako bi se postigla dinamika plinova što je bliže moguća onoj u stvarnom modelu. Duljine i promjeri cijevi znatno utječu na momentnu karakteristiku motor te je iz toga razloga krucijalno dobro postavljanje istih. Elementi cilindra su na usisnoj i ispušnoj strani spojeni cijevima kako je prikazano na slikama 3.1. i 3.2. Simuliranje izgaranja u elementima cilindra provodi se dvozonskim modelom uz primjenu Vibeove funkcije.

3.5. Pregled rezultata simuliranja radnog područja motora

Prikazanim simulacijskim modelom izlazna snaga i moment se podudaraju s vrijednostima deklariranim od strane proizvođača sa maksimalnim odstupanjem od 2% kod $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ čime je dobiven Ottov motor ekvivalentan onom opisanom u tablici 3.1.



Slika 3.6. Simulirane vrijednosti momenta



Slika 3.7. Simulirane vrijednosti snage

Nakon dobivanja karakterista momenta i snage korištenjem opcije kontrole srednjeg efektivnog tlaka (eng. “*BMEP Control*”) kojeg nudi AVL Boost provedena je simulacija djelomičnih opterećenja motora. Srednji efektivni tlak dobiven simuliranjem maksimalnog opterećenja skaliran je u koracima od 10% kod većih opterećenja dok je kod manjih skaliran sa manjim korakom od 5% kako bi se povećala gustoća radnih točaka pri nižim opterećenjima potrebnih za prikaz topografskih dijagrama.

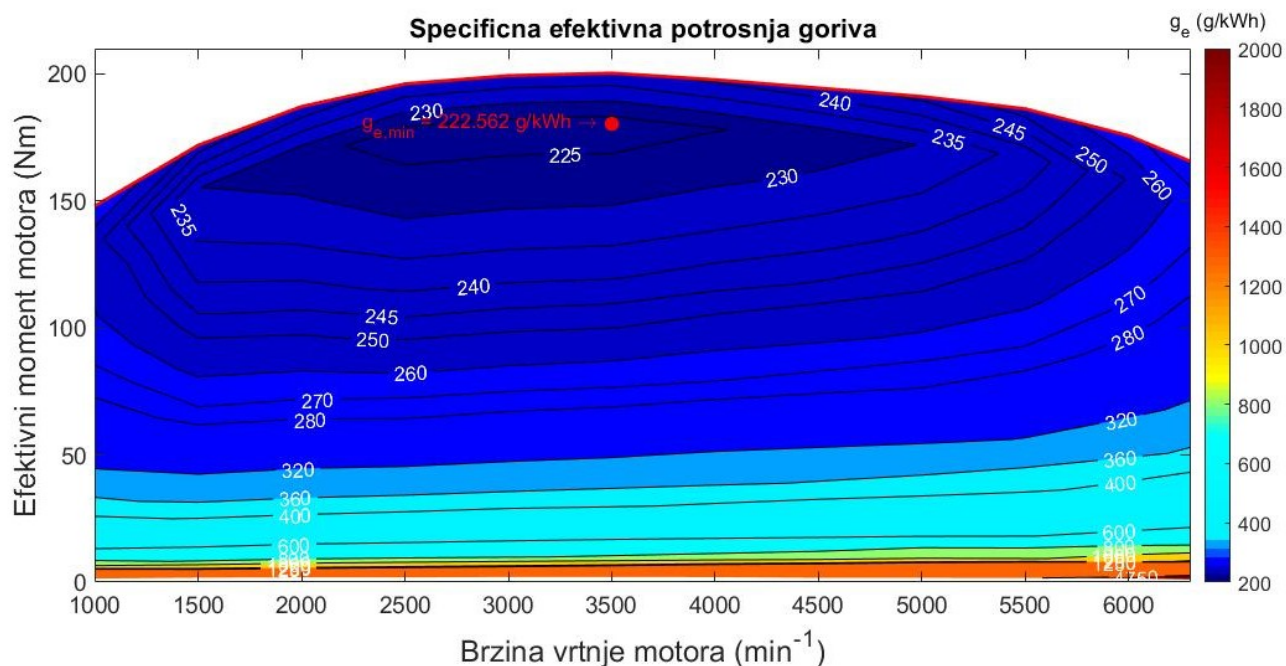
Specifična efektivna potrošnja goriva g_e (kg/J) je omjer masene potrošnje goriva i efektivne snage motora. Međutim, ovakva koherentna jedinica SI-sustava je izrazito neprikladna za praktičnu primjenu. Zbog toga se u tehnici motora specifična efektivna potrošnja goriva računa kao omjer satne masene potrošnje goriva $m_{G,h}$ i snage motora P_e :

$$g_e = \frac{m_{G,h}}{P_e}. \quad (3.1.)$$

Specifičnom efektivnom potrošnjom goriva direktno se preko formule (3.2.) može odrediti efektivni stupanj djelovanja motora gdje je mjerna jedinica specifične efikasne potrošnje goriva g_e [kg/kWh] i donja ogrijevna vrijednost H_d [MJ/kg]:

$$\eta_e = \frac{3,6}{g_e \cdot H_d} \quad (3.2.)$$

Obradom simulacijom dobivenih vrijednosti primjenom Microsoft Excel-a te MathWorks MATLAB programa dobiven je topografski dijagram specifične efektivne potrošnje VW 2.0I FSI motora prikazan na slici 3.8.



Slika 3.8. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva za VW 2.0I FSI motor

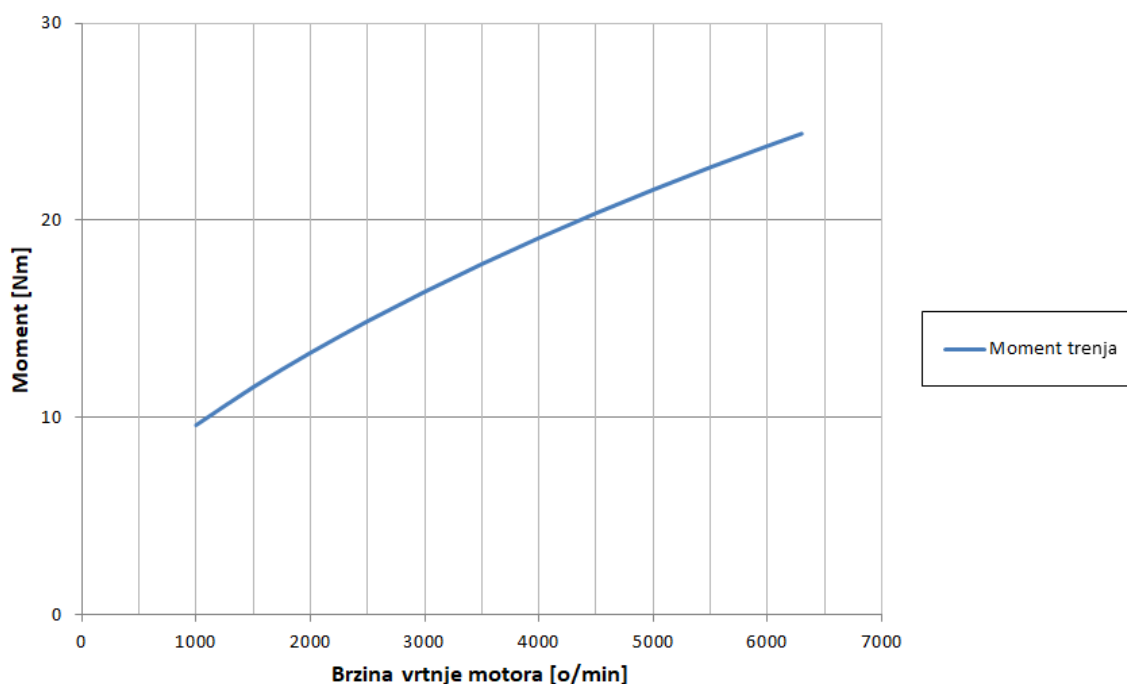
Dobiveni topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva prikazan na slici 3.8. poprima karakterističan oblik takvog tipa dijagrama te prokazuje kako se najefikasnija radna točka motora nalazi kod rada na 90% opterećenja te $n = 3500 \text{ min}^{-1}$. Nadalje se može primjetiti kako smanjivanjem opterećenja motora, odnosno približavanjem radu u praznom hodu vrijednosti specifične efektivne potrošnje goriva teže beskonačno velikim vrijednostima što je posljedica definicije specifične efektivne potrošnje goriva.

4. MINIMALNA OPTEREĆENJA OSTVARIVA NASUMIČNIM ISKLJUČIVANJEM CILINDARA BEZ PRIGUŠAVANJA USISA

Korištenjem manjeg broja aktivnih cilindara, tj. manje gustoće paljenja cilindara moguće je ostvarivanje velikog raspona izlaznog momenta uz veću efikasnost. Veća efikasnost u aktivnim cilindrima postižemo radom u području veće opterećenosti svakog pojedinog cilindra.

4.1. Princip određivanja minimalnih opterećenja

Na slici 4.1. je prikazana karakteristika momenta uzrokovanog trenjem unutarnjih komponenata motora. Kako bi motor radio u praznom hodu uz djelovanje DSF sustava potrebno je odrediti minimalnu gustoću paljenja za koju motor proizvodi dovoljno izlaznog momenta da se pokriju gubici trenja. Pošto se moment trenja mijenja povećanjem brzine vrtnje motora potrebno je regulirati gustoću paljenja kako bi se zadovoljio izlazni moment.

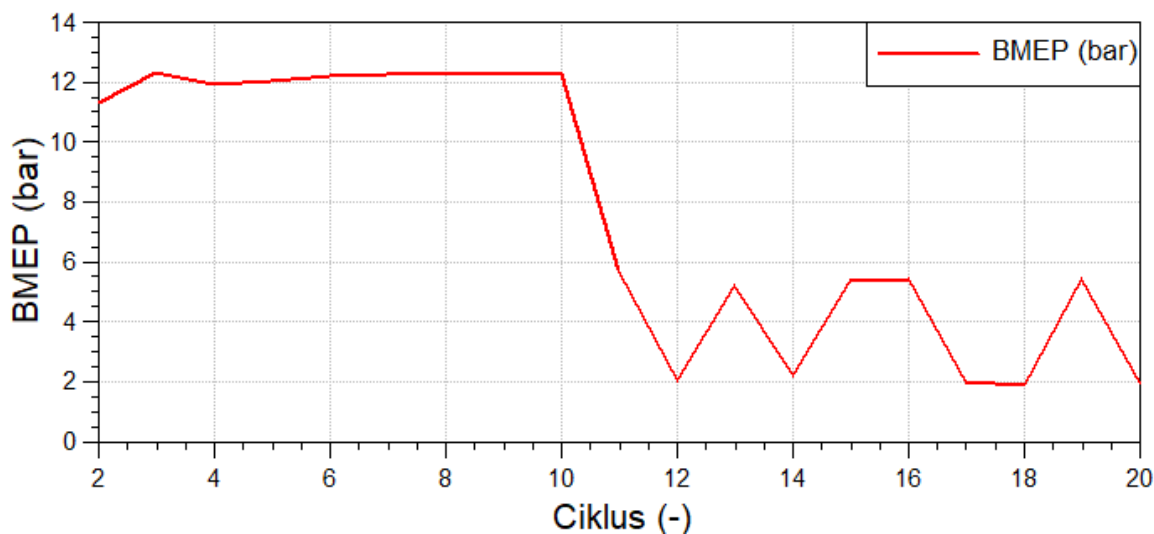


Slika 4.1. Moment mehaničkih gubitaka simuliranog motora

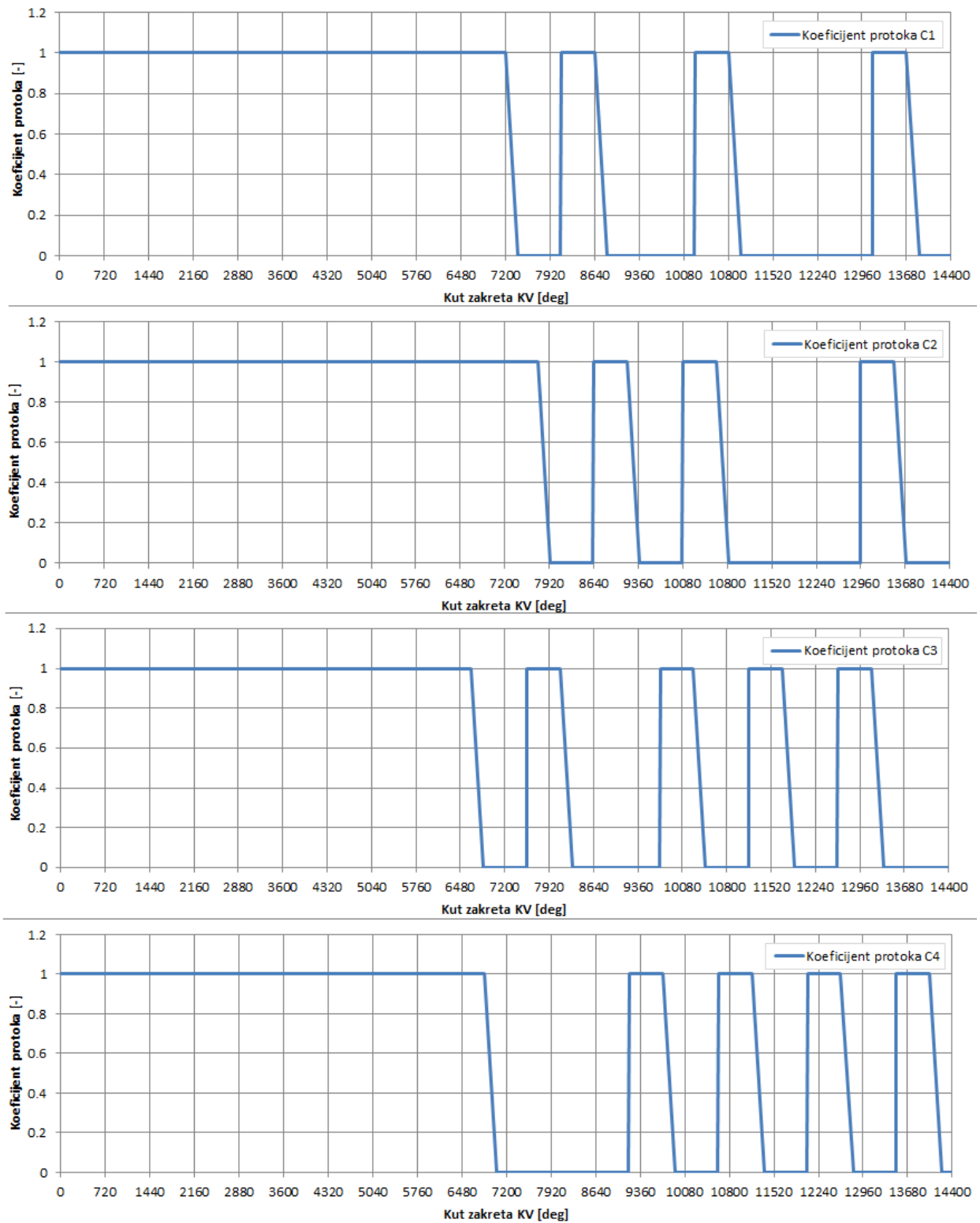
Svaki kontrolni element upravlja sa dva restriktora (jedan na usisnoj strani, drugi na ispušnoj strani cilindra) i omjerom zraka i goriva. Restriktorski elementi su postavljeni što je bliže moguće samom cilindru kako bi simulirali isključivanje ventila pošto programski paket ne omogućava dinamično isključivanje i uključivanje razvodnih ventila.

Simuliranje rada sa isključivanjem cilindara odrađeno je tako da program provede deset ciklusa normalnog rada motora nakon čega kontrolni modul mijenja vrijednosti koeficijenta protoka u rasponu od 1 do 0 (1 – otvoreni ventili, 0 – zatvoreni ventili) kao što je prikazano na slici 4.4. Isključivanje cilindara provodi se na način da se ispušni i usisni ventili zatvore u trenutku kada se u cilindru nalazi minimalna količina zaostalih produkata izgaranja, tj. masa tvari u cilindru je minimalna. Ponovno uključivanje cilindara provodi se na način da prije ponovnog izgaranja se odradi ispiranje cilindra u svrhu postizanja optimalnih uvjeta za izgaranje. Promjenu koeficijenta protoka prati promjena omjera zraka i goriva prema principu kada su razvodni ventili aktivni simulacijski model koristi stehiometrijsku smjesu te kada su ventili isključeni prekida se dotok goriva u sustav.

Korištenjem svega prethodno navedenoga, srednji efektivni tlak nakon prvih deset ciklusa normalnog rada motora pod punim opterećenjem više nema konstantnu karakteristiku već ovisi o tome koliko je cilindara isključeno u kojem ciklusu, vidljivo na slici 4.3.



Slika 4.3. Srednji efektivni tlak u pojedinim ciklusima kod gustoće paljenja $FD = 40\%$ na $n = 3500 \text{ min}^{-1}$

Slika 4.4. Promjena koeficijanta protoka po cilindrima kod gustoće paljenja $FD = 40\%$

Kako bi se dobili valjani rezultati kojima bi se mogla ustanoviti učinkovitost DSF sustava potrebno je uzimati u obzir samo zadnjih deset ciklusa u kojima je sam DSF sustav simuliran. Vrijednosti momenta dobivene su tako da je uzeta srednja vrijednost momenta za zadnjih deset ciklusa, dok je vrijednost srednje efektivne potrošnje goriva bilo potrebno računati prema izrazu (3.1.). Vrijednosti uvrštavane u naveden izraz su također bile osrednjene kroz zadnjih deset ciklusa.

4.3. Rezultati simulacije

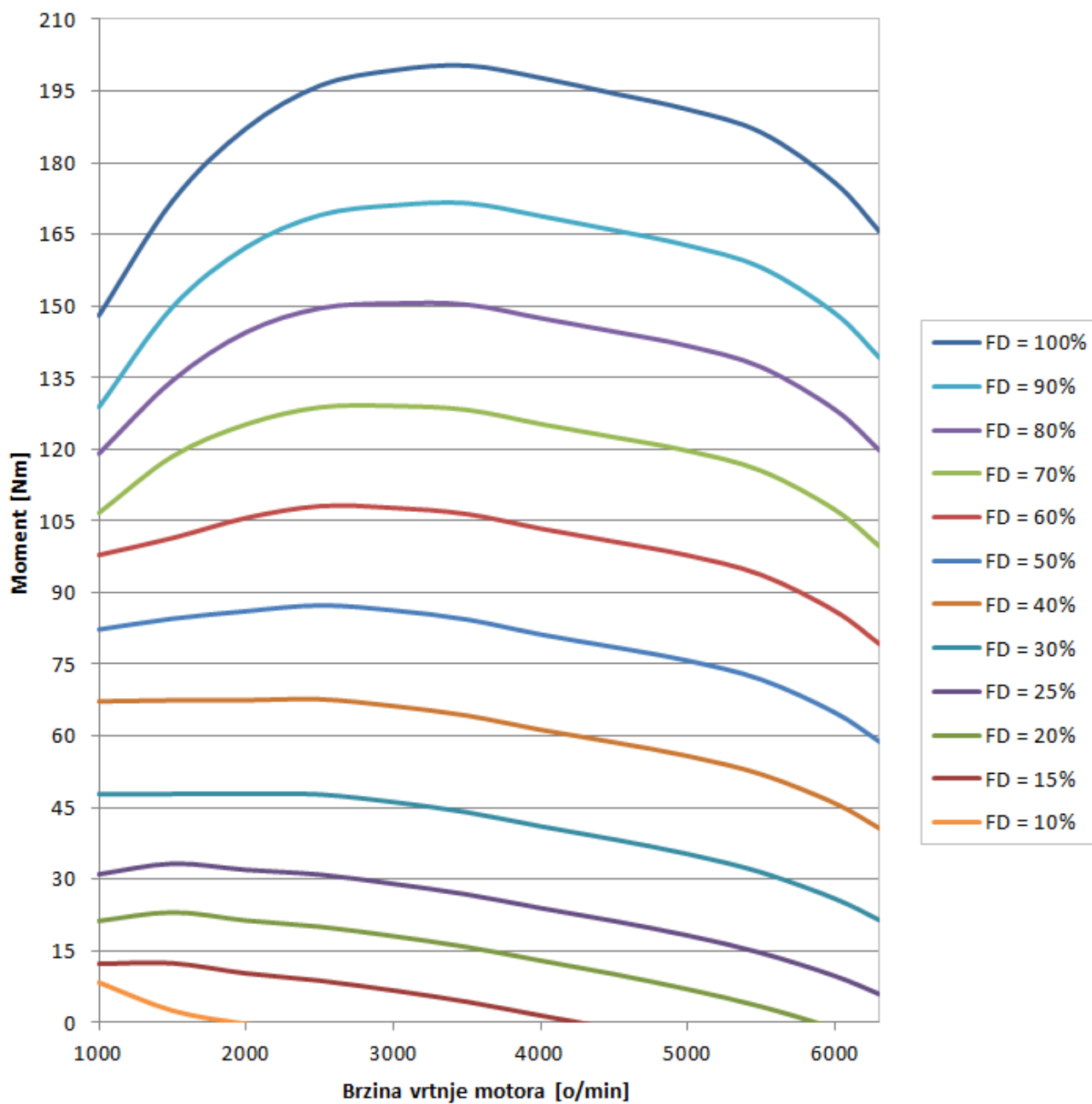
Simuliranjem različitim gustoća paljenja dobivene su karakteristike efektivnih momenata za raspon gustoća paljenja od $FD = 15\%$ do $FD = 90\%$ prikazane na slici 4.5. Dobivenim momentnim karakteristikama nemožemo pokriti cijelo područje praznog hoda te su interpolacijom i ekstrapolacijom određene gustoće paljenja potrebne za ostvarivanje praznog hoda u cijelom rasponu brzina vrtnje motora. Tablica 4.1. sadrži gustoće paljenja kojima bi bilo moguće ostvariti rad u praznom hodu kada stabilnost rada motora kod niskih brzina vrtnje nebi predstavljala problem.

Tablica 4.1. Vrijednosti gustoća paljenja za ostvarivanje praznog hoda bez prigušenja usisa

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| n [min ⁻¹] | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | 6300 |
| FD [-] | 8,43 | 9,15 | 10,15 | 11 | 12 | 13,08 | 14,35 | 15,62 | 17 | 18,56 | 20,61 | 22,23 |

Kod motora opremljenih DSF sustavom minimalna gustoća paljenja je limitirana dinamikom klipnog mehanizma kod niskih gustoća paljenja. Radom motora kod kojeg je isključeno više uzastopnih cilindara postoji mogućnost od zaustavljanja motora, posebno kod manjih brzina vrtnje. Kada se potražnja momenta približi vrlo malim vrijednostima gustoća paljenja je ograničena na $FD = 20\%$ ili manje kako bi si smanjio broj uzastopno isključenih cilindara te kako bi se ostvario stabilan rad motora [10].

Uzimajući u obzir minimalne gustoće paljenja ostvarive u praksi, $FD = 15\%$ je uzeta kao donja granica gustoće paljenja. Zbog toga je prazan hod nemoguće u praksi ostvariti sa DSF radom motora bez prigušenja sustava iznad $n = 4300 \text{ min}^{-1}$. Ako želimo postići prazan hod motora sa DSF-om u području ispod te brzine vrtnje potrebno je primjeniti, uz gustoću paljenja $FD = 15\%$, prigušenje usisne grane sa zaklopkom.



Slika 4.5. Efektivni moment za gustoće paljenja od $FD = 10\%$ do $FD = 90\%$ bez prigušenja usisa.

5. RAZDIOBA ENERGIJE

Kao u svakom realnom termodinamičkom procesu kod rada motora postoje energetske gubitke koji smanjuju efikasnost sustava, samo oko trećine dovedene energije se pretvara u koristan rad. Termodinamičke gubitke predstavljaju: Q_{hl} – toplina odvedena hlađenjem motora, Q_{isp} – toplina odvedena ispušnim pinovima, Q_{zr} – toplina odvedena zračenjem vrućih dijelova motora i Q_m – toplina utrošena na mehaničke gubitke u motoru. Razdioba toplinske energije je dana jednadžbom (5.1.)

$$Q_1 = Q_e + Q_{hl} + Q_{isp} + Q_{zr} + Q_m \quad (5.1.)$$

5.1. Razdioba energije kod normalnog rada motora i rada sa DSF sustavom

Razdioba energije motora obrađena je za 4 radne točke. Radne točke su odabrane tako da se nalaze u radnom području u kojem se prema [5] očekuje poboljšanje efikasnosti rada motora sa DSF sustavom u odnosu na normalan rad motora. Svaka radna točka razmotrena je za normalan rad motora bez isključivanja cilindara i za rad uz nasumično isključivanje cilindara. Radne točke navedene u tablici 5.1. su definirane brzinom vrtnje motora te srednjim efektivnim tlakom.

Tablica 5.1. Radne točke kod normalnog rada motora

| Broj radne točke | Brzina vrtnje motora | Srednji efektivni tlak |
|------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | $n = 1500 \text{ o/min}$ | $p_e = 0,938 \text{ bar}$ |
| 2 | $n = 1500 \text{ o/min}$ | $p_e = 1,634 \text{ bar}$ |
| 3 | $n = 2000 \text{ o/min}$ | $p_e = 3,557 \text{ bar}$ |
| 4 | $n = 3000 \text{ o/min}$ | $p_e = 6,313 \text{ bar}$ |

Rezultati energetske bilance provedene sa simulacijskim modelom prikazanim na slici 4.2. su navedeni u tablici 5.2., tablici 5.3., tablici 5.4. i tablici 5.5.

Tablica 5.2. Razdioba toplinske energije u točki 1.

| Toplinska energija | Normalan rad motora | DSF |
|--------------------|---------------------|--------|
| Q_e (%) | 17,37 | 23,66 |
| Q_{hl} (%) | 38,84 | 15,09 |
| Q_{isp} (%) | 32 | 46,95 |
| Q_m (%) | 11,79 | 14,15 |
| g_e (g/kWh) | 491,051 | 316,51 |

Tablica 5.3. razdioba toplinske energije u točki 2.

| Toplinska energija | Normalan rad motora | DSF |
|--------------------|---------------------|--------|
| Q_e (%) | 21,85 | 27,27 |
| Q_{hl} (%) | 35,5 | 15,82 |
| Q_{isp} (%) | 32,95 | 49,60 |
| Q_m (%) | 9,70 | 11,46 |
| g_e (g/kWh) | 390,248 | 279,52 |

Tablica 5.4. Razdioba toplinske energije u točki 3.

| Toplinska energija | Normalan rad motora | DSF |
|--------------------|---------------------|--------|
| Q_e (%) | 29,41 | 33,93 |
| Q_{hl} (%) | 26,35 | 15,57 |
| Q_{isp} (%) | 37,32 | 43,28 |
| Q_m (%) | 6,92 | 6,64 |
| g_e (g/kWh) | 289,99 | 242,75 |

Tablica 5.5. Razdioba toplinske energije u točki 4.

| Toplinska energija | Normalan rad motora | DSF |
|--------------------|---------------------|--------|
| Q_e (%) | 34,27 | 36,45 |
| Q_{hl} (%) | 20,45 | 14,41 |
| Q_{isp} (%) | 39,67 | 42,37 |
| Q_m (%) | 5,61 | 5,5 |
| g_e (g/kWh) | 248,86 | 221,07 |

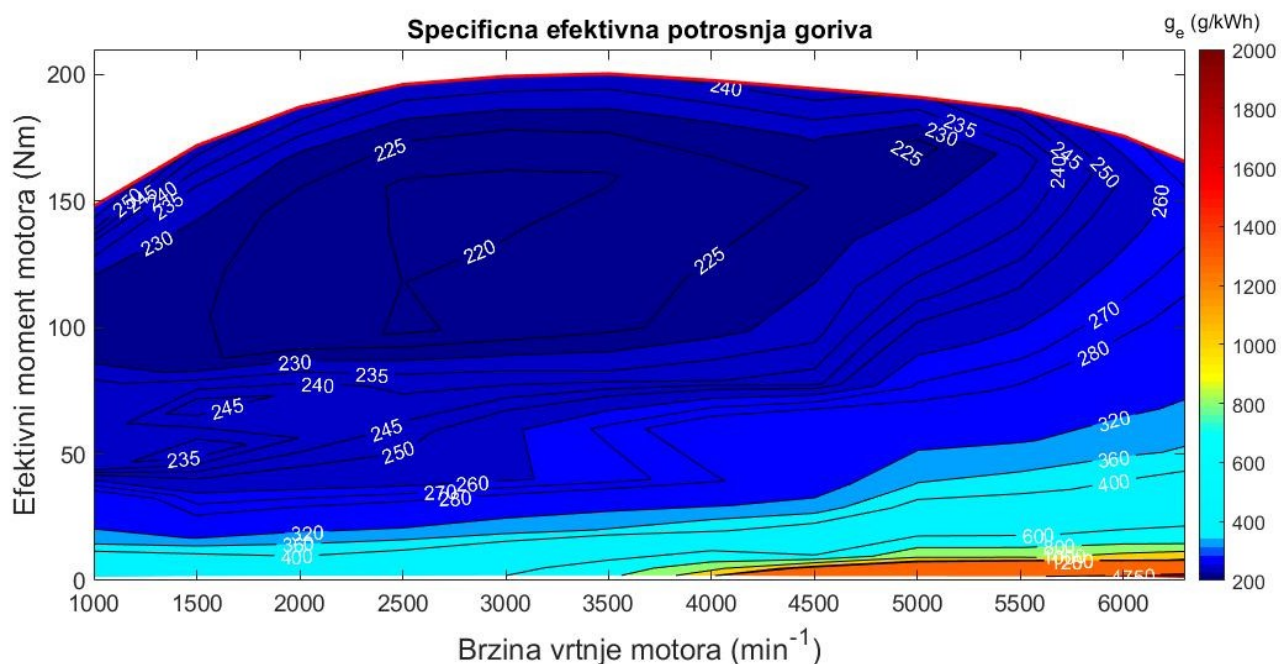
Prema jednadžbi (3.2) efektivni stupanj djelovanja je obrnuto proporcijonalno povezan sa specifičnom efektivnom potrošnjom (manja specifična efektivna potrošnja rezultira većim efektivnim stupnjem djelovanja). Analizom rezultata se može zaključiti kako motor opremljen DSF sustavom u sve četiri točke radi sa većim efektivnim stupnjem djelovanja.

6. STRATEGIJA UPRAVLJANJA RADOM MOTORA

Sustav nasumičnog isključivanja cilindara pokazuje velik potencijal za smanjenje potrošnje i smanjenja emisije ispušnih plinova kod smanjenih opterećenja no pitanje kada i na koji način koristiti DSF sustav je krajnje kompleksno. Uz rezultate prikazane u prethodnim poglavljima potrebno je još napraviti analizu specifične efektivne potrošnje goriva za cijelo područje djelomičnih opterećenja kako bi se moglo definirati u kojim područjima DSF sustav ostvaruje poboljšanja u odnosu na normalan način rada.

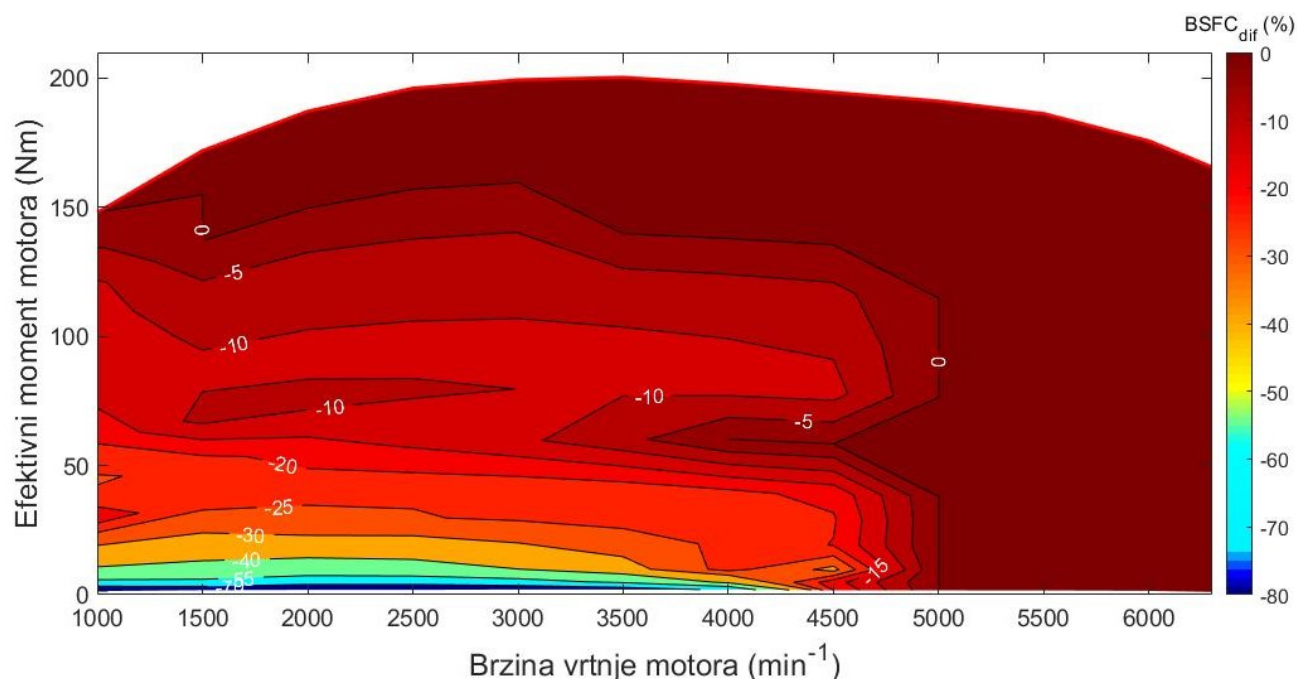
6.1. Definiranje područja efikasnosti DSF sustava

Kako bi odredili gdje DSF sustav pokazuje uštedu prikazan je topološki dijagram specifične efektivne potrošnje za rad motora sa DSF sustavom bez prigušenja usisa. Momentnim krivuljama na slici 4.5. pridružene su vrijednosti specifične efektivne potrošnje što je prikazano na slici 6.1.



Slika 6.1. Topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva DSF sustava bez prigušenja usisne grane.

Usporedbom dijagrama na slikama 3.8. i 6.1. dobiva se relativno smanjenje specifične efektivne potrošnje goriva za cijelo područje rada motora koje je prikazano na slici 6.2. Korištenjem ovakve usporedbe moguće je odrediti raspon djelomičnih opterećenja u kojima DSF tehnologija pokazuje poboljšanja u odnosu na normalan rad motora.

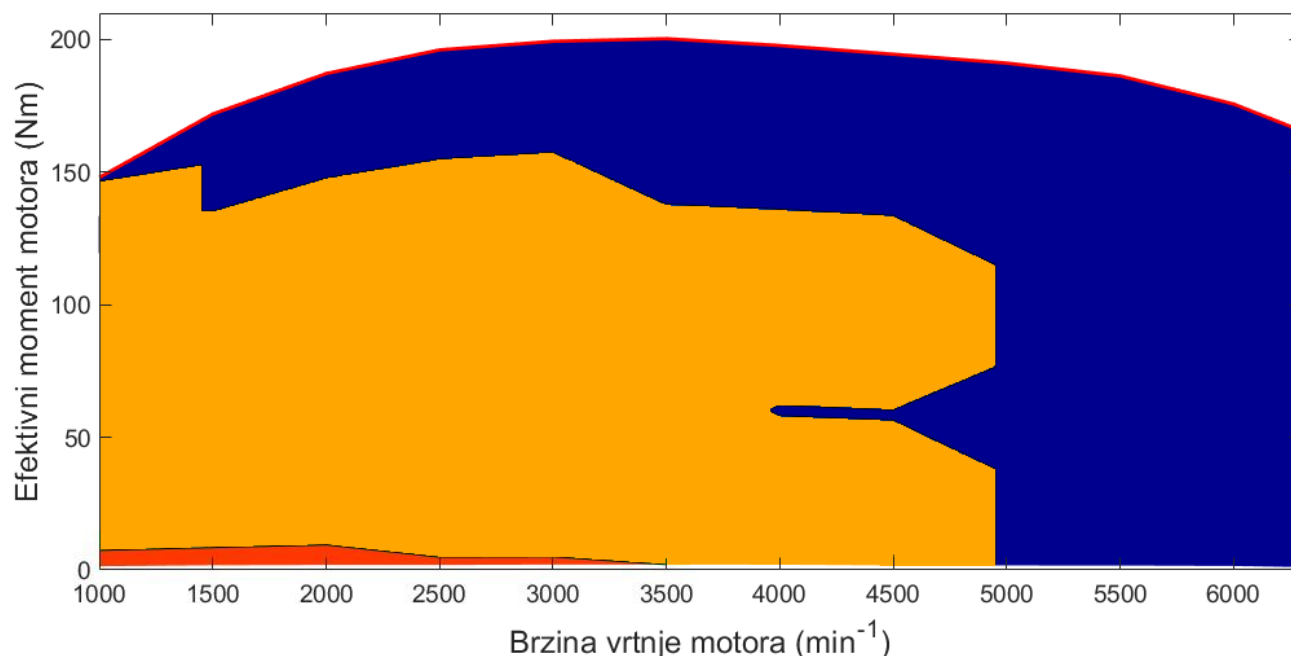


Slika 6.2. Relativno smanjenje specifične efektivne potrošnje goriva sa DSF-om bez prigušenja usisa u odnosu na normalan rad motora.

Na topološkom dijagramu na slici 6.2. ucrtana su područja na kojima se pokazuje poboljšanje što znači da područja označena nulom ne pokazuju smanjenje u specifičnoj efektivnoj potrošnji te samim time ne postoji prednost korištenja DSF tehnologije u ovom području rada motora. Potencijal DSF tehnologije pokazuje se na brzinama vrtnje ispod $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ te opterećenjima koja su manja od $M_e = 140 \text{ Nm}$.

Strategija upravljanja motora opremljenog sa DSF sustavom, uz rezultate prikazane na slici 6.2. te prethodnim poglavljima, se može podijeliti u tri distinktna načina rada kao što je prikazano na slici 6.3. Plavo područje predstavlja normalan način rada uz prigušavanje usisne cijevi pošto u ovom području DSF sustav ne pokazuje poboljšanja. Narančasto označeno područje označava rad motora

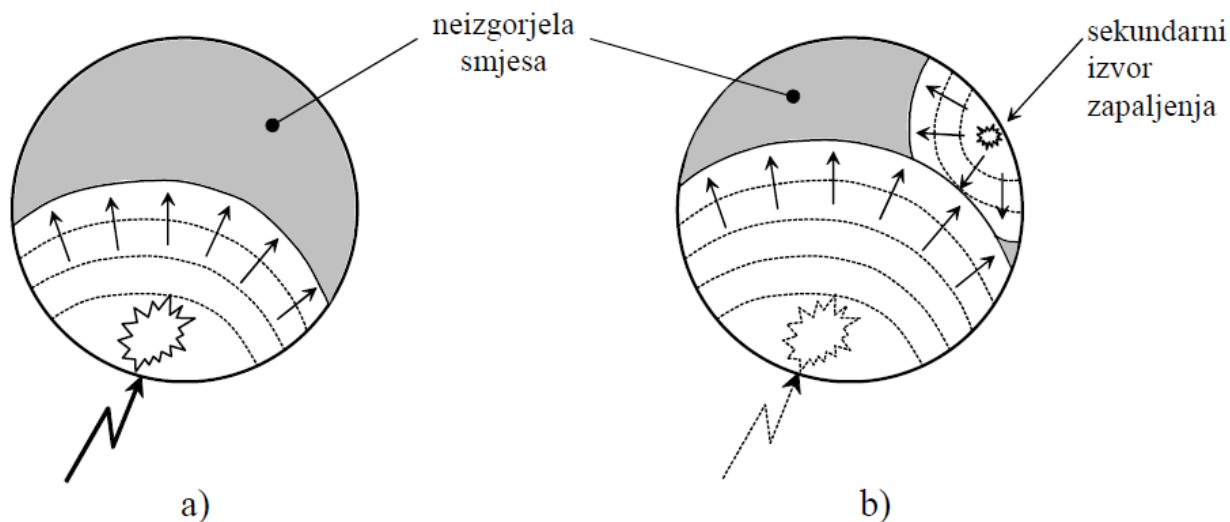
sa nasumičnim isključivanjem cilindara bez prigušenja usisne grane dok crveno obojeno područje predstavlja rad motora sa gustoćom paljenja $FD = 15\%$ uz prigušavanja usisne grane.



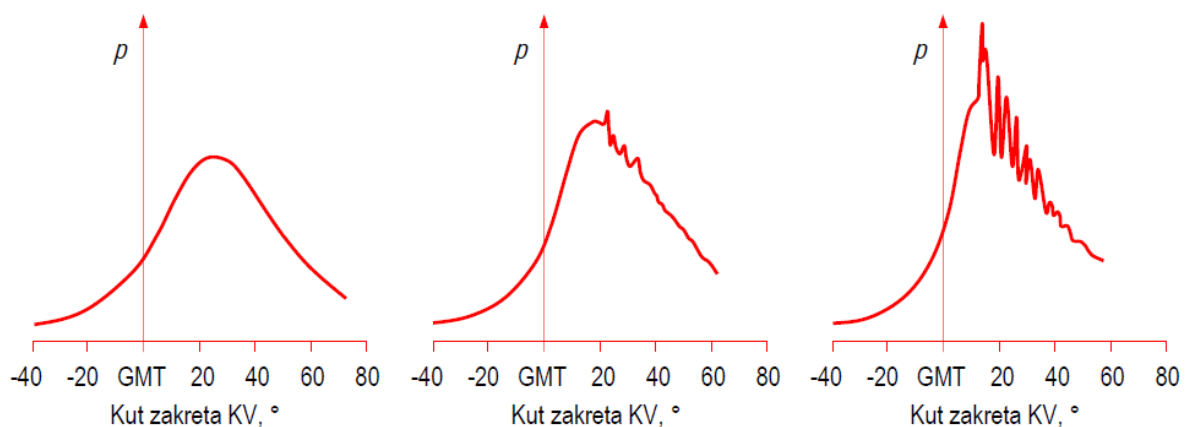
Slika 6.3. Strategija upravljanja radom motora: normalan rad motora sa prigušivanjem usisne grane (plavo), rad motora sa DSF sustavom bez prigušenja usisne grane (narančasto), rad motora sa gustoćom paljenja $FD = 15\%$ uz prigušenje usisne grane (crveno)

6.2. Kontrola detonantnog izgaranja

Detonantno izgaranje je najpoznatiji i najvažniji od svih oblika nenormalnog izgaranja u Ottovom motoru. Detonaciju treba pod svaku cijenu izbjeći, jer ona može u vrlo kratkom vremenu uništiti motor. Do detonacije dolazi zbog toga što se u neizgorenoj smjesi u cilindru temperatura kompresijom povisi iznad granice samozapaljenja što dovodi do pojave sekundarnih izvora upaljivanja na nekom vrućem mjestu u prostoru izgaranja kao što je prikazano na slici 6.4. Uslijed detonacije javlja se titranje tlaka u cilindru (slika 6.5.) koje se prenosi na klipni mehanizam što u periodu od petnaestak minuta rada sa detonantnim izgaranjem može dovesti do velikih oštećenja u motoru.



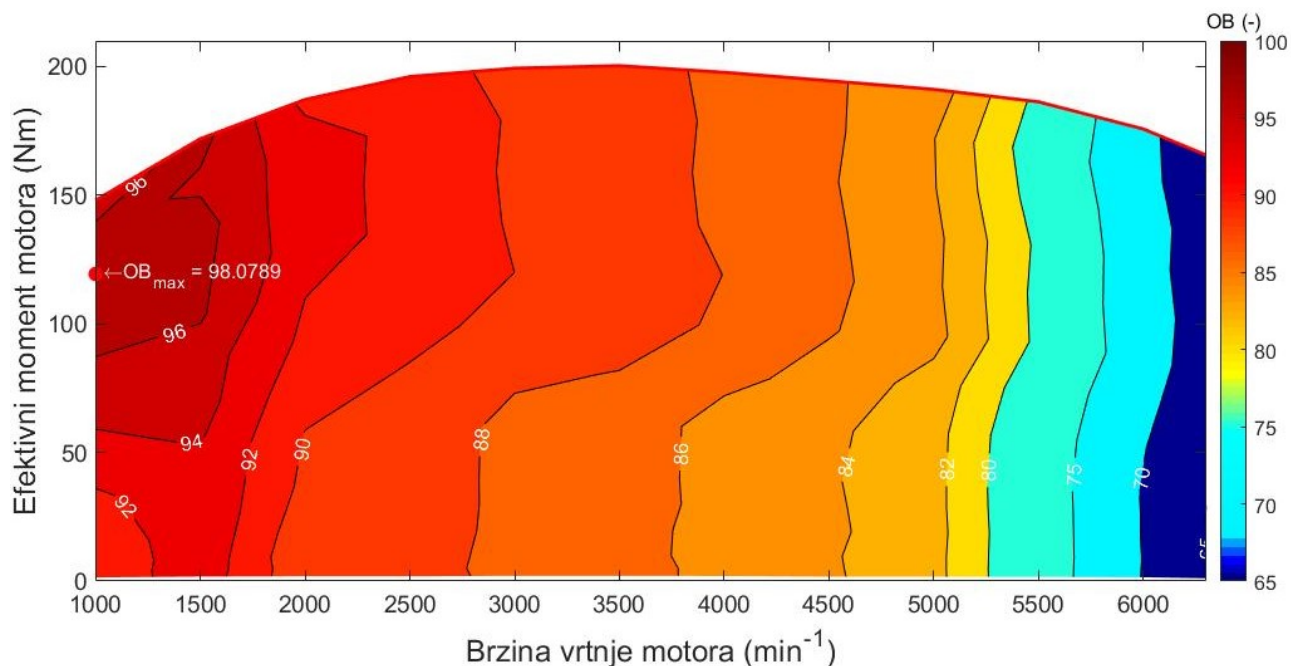
Slika 6.4. Detonacija u cilindru Ottovog motora. Plinovi komprimiraju neizgorjenu smjesu (a) kojoj znatno raste tlak i temperatura pa dolazi do sekundarnog upaljenja (b) na nekom vrućem mjestu u prostoru izgaranja. [9]



Slika 6.5. Tlak u cilindru: normalno izgaranje (lijevo), pomalo detonantno (sredina) i izrazito detonantno izgaranje (desno) [9]

Motor koji radi sa DSF sustavom ima tendenciju da se izgaranje kod djelomičnih opterećenja odvija uz povišene temperature izgaranja što dovodi do povećanog rizika od pojave detonantnog izgaranja. Iz tog razloga je potrebno na motor opremljen DSF sustavom postaviti osjetnike detonacije koji detektiraju titranja tlaka uslijed detonantnog izgaranja te taj signal prosljeđuju u kontrolno računalo koje naknadno smanjuje kut predpaljenja kako bi se vršna vrijednost tlaka smanjila te time spriječilo detonantno izgaranje.

Model detonantnog izgaranja u korištenom AVL Boost softveru proračunava minimalni oktanski broj potreban za rad motora bez detonantnog izgaranja. Ako vrijednost oktanskog broja $OB > 100$ tada se za taj slučaj izgaranje odvija uz detonaciju.



Slika 6.6. Topografski dijagram oktanskog broja za rad motora sa DSF sustavom bez prigušenja usisne grane

Vrijednosti prikazane na slici 6.6. prikazuju veću vjerojatnost za pojavom detonantnog izgaranja kod nižih brzina vrtnje, no potrebno je imati na umu da su simulirane vrijednosti dobivene kroz period od samo 10 ciklusa. Kako se detonantno izgaranje može pojaviti i kod dužeg rada na većim brzinama vrtnje motora preventivne mjere navedene u prethodnim odlomcima su preporučljive kako bi se ostvarila sigurnost rada i dugovječnost ovakvog motora.

7. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih simulacijom u programskom paketu AVL Boost 2013.2 pokazalo se kako, kod primjene na simuliranom motoru, tehnologijom nasumičnog isključivanja cilindara bez prigušenja usisa nije moguće ostvariti prazan hod motora već je prigušenje usisa potrebno kod brzina vrtnje manjih od $n = 4300 \text{ min}^{-1}$. Razdioba toplinske energije je pokazala kako nasumičnim isključivanjem cilindara je moguće smanjiti specifičnu efektivnu potrošnju goriva, odnosno povećati efektivni stupanj djelovanja rada motora u četiri razmotrene radne točke. Razmatranjem cijelog radnog područja motora pokazalo se kako DSF tehnologija ostvaruje smanjenje u specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva kod djelomičnih opterećenja pri nižim brzinama vrtnje motora do 80%. Kako bi se ostvarila minimalna potrošnja goriva za cijeli radni spektar rada motora, područje rada motora podijeljeno je u tri distinktna područja: normalan rad motora, rad motora sa nasumičnim isključivanjem bez prigušenja usisa i rad motora sa gustoćom paljenja $FD = 15\%$ uz prigušenje usisa (slika 6.3.). Ovakvu podjelu mape motora diktira efikasnost DSF sustava bez prigušenja usisa samo kod brzina vrtnje ispod $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ te opterećenjima koja su manja od $M_e = 140 \text{ Nm}$. Nestabilnost rada motora sa manjim brojem aktivnih cilindara kod nižih brzina vrtnje nalaže da sva djelomična opterećenja, koja se nemogu ostvariti gustoćama paljenja većim ili jednakim $FD = 15\%$, se ostvare gustoćom paljenja $FD = 15\%$ uz prigušenje usisa zaklopkom. Ostatak radnog područja motora u kojima prethodna dva navedena načina rada ne pokazuju poboljšanja u specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva, se pokriva sa normalnim radom motora gdje se djelomična opterećenja ostvaruju prigušenjem usisa zaklopkom. Prelazak iz jednog radnog područja u drugo je moguće vrlo suptilno ostvariti pošto DSF tehnologija omogućava potpunu kontrolu nad vibracijskim pobudama motora čime se mogu postići vrlo dobre NVH karakteristike vozila. Iako primjenom DSF tehnologije cilindri rade pod većim opterećenjima opasnost od detonantnog izgaranja se zadržava samo kod nižih brzina vrtnje motora, što je karakteristično za Ottove motore. Mjere za prevenciju detonantnog izgaranja netrebaju biti veće od onih primjenjenih na vozila bez DSF tehnologije.

LITERATURA

- [1] Wilcutts, M., Switkes, J., Shost, M., Tripathi, A.: *Design and Benefits of Dynamic Skip Fire Strategies for Cylinder Deactivated Engines*, Tulla Technology, Inc, SAE International, 2013.
- [2] Ortiz-Soto, E., Wang, R., Nagashima, M., Younkis, M., Müller, A., Tews, S., Balazs, A., Thewes, M.: *λ DSF: Dynamic Skip Fire with Homogeneous Lean Burn for Improved Fuel Consumptino, Emissions and Drivability*, SAE International, 2018.
- [3] Van Ess, J., Wolk, B., Fuschetto, J., Wang, R., Younkis, M.: *Method to Compensate Fueling for Individual Fireing Events in a 4-Cylinder Engine Operated with Dynamic Skip Fire*, SAE International, 2018.
- [4] <https://www.avl.com/boost>, (rujan 2020.)
- [5] *The 2.0l FSI engine with 4-valve technology*, Volkswagen AG, Wolfsburg, 2003
- [6] <https://forums.vwvortex.com/showthread.php?3124583-2-0T-FSI-connecting-rod-length>, (rujan 2020.)
- [7] <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Volkswagen/1254/Volkswagen-Golf-5-20-FSI.html>, (rujan 2020.)
- [8] <http://www.zeperfs.com/en/fiche1221-vw-golf-v-2-0-fsi.htm>, (rujan 2020.)
- [9] Mahalec, I., Lulic, Z., Kozarac, D.: *Motori s unutaršnjim izgaranjem*, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [10] Wilcutts, M., Nagashima, M., Eisazadeh-Far, K., Younkis, M.: *Electrified Dynamic Skip Fire (eDSF): Design and Benefits*, Tula Technology, Inc, 2018.
- [11] Chen, K., Mandal, A., Chien, L.C., Ortiz-Soto, E.: *Machine Learning for Misfire Detection in a Dynamic Skip Fire Engine*, Tula Technology, Inc., 2018.
- [12] Chien, L.C., Younkis, M., Wilcutts, M.: *Modeling and Simulation of Airflow Dynamics in a Dynamic Skip Fire Engine*, SAE International, 2015.

- [13] Scassa, M., George, S., Nencioni, M., Chen, K., Younkis, M., Wang, R., Körfer, T.: *Dynamic Skip Fire Applied to a Diesel Engine for Improved Fuel Consumption and Emissions*, SAE International, 2019.
- [14] Yar, A., Anjum, R., Ahmed, Q., Bhatti, A.: *A Framework for Model Based Detection of Misfire in Gasoline Engine with Dynamic Skip Fire*
- [15] Chen, K., Mandal, A. Chien, L.C., Ortiz-Soto. E.: *Machine Learning for Misfire Detection in a Dynamic Skip Fire Engine*, SAE International, 2018.
- [16] AVL BOOST™ - version 2013.2., *Users Guide and Theory*

PRILOZI

I. CD-R Disk