

RAZVOJ BENZINSKOG MOTORA DMB 1.4 SA TURBOPUNJENJEM I ELEKTRONSKIM UBRIZGAVANJEM

DEVELOPMENT OF GASOLINE ENGINE DMB 1.4 WITH TURBOCHARGING AND ELECTRONIC FUEL INJECTION

Miroljub Tomić, Stojan Petrović, Slobodan Popović, Nenad Miljić

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd

Rezime: U radu je prikazan razvoj turbopunjenja i sistema ubrizgavanja benzina na inoviranom oto motoru zapremine 1.4 l, proizvodnje DMB. Zbog primene natpunjenja nije mogao biti korišćen standardni sistem ubrizgavanja već je razvijen novi elektronski sistem za upravljanje sistemom MPI ubrizgavanja goriva i paljenja. Takođe, regulacija pritiska nadpunjenja vršena je preko elektronskog sistema kontrole zaobilaznog ventila turbine (waste gate), kako bi se omogućila kontrola porasta pritiska kompresora na pojedinim režimima rada motora. S obzirom na moguću pojavu detonacije, razvijen je poseban sistem za detekciju ove pojave. U radu se takođe daju dobijeni rezultati optimiranja ovog turbopunjenog motora.

Ključne riječi: Oto motor, turbopunjenje, međuhlađenje, ubrizgavanje goriva, detonacija

Abstract: The paper presents the results of the development of turbo charging and gasoline injection system at new DMB 1.4 l spark ignition engine. Standard gasoline injection system could not be used because of engine charging, therefore new electronic system for gasoline injection and ignition has been developed. Also, the engine boost pressure has been regulated by new developed electronic control of waste gate enabling the optimization of engine boost pressure at every operating point. Having in mind possible detonation, special system for knock occurrence detection has been developed. The main results of turbocharged engine testing are presented in the paper.

Keywords: Spark ignition engine, turbocharging, intercooling, fuel injection, detonation

1. UVOD

„Down sizing“ je danas u svetu popularan naziv za tehnologiju koja bukvalno znači smanjenje veličine (radne zapremine) motora, tj. ostvarenje veće snage iz motora malih dimenzija, a u suštini predstavlja primenu turbopunjenja na oto motoru. Na taj način se ostvaruju ne samo zavidne performanse motora u pogledu snage i toka krive obrtnog momenta kod motora visoke klase, već se kod relativno malih motora ostvaruje visoka ekonomičnost. Danas praktično svi renomirani proizvođači automobilskih oto motora imaju razvijene ili razvijaju verzije turbopunjenih oto motora.

Primena turbopunjenja kod oto motora je znatno delikatnija nego kod dizel motora kod kojih je turbopunjenje danas praktično standardna tehnologija. Osnovni problemi su

detonantno sagorevanje, i visoke temperature izduvnih gasova koje mogu biti problematične za kućište i lopatice turbine. Zbog toga je kod oto motora vrlo ograničen porast pritiska u kompresoru, obavezna je primena međuhlađenja i podrazumeva se vrlo delikatno upravljanje radnim procesom (sastav smeše, regulacija pretpaljenja). Često ni ovo nije dovoljno već je do skoro nezaobilazna mera bila sniženje stepena sabijanja motora, a na kritičnim režimima rada i primena bogatije smeše i smanjenje ugla pretpaljenja. Ove mere imaju negativan efekat na ekonomičnost, tako da je praktično bilo pravilo da turbopunjeni oto motor ima slabiju, ili u najboljem slučaju istu ekonomičnost u odnosu na usisni motor. Međutim, razvojem novih tehnologija, kao što su: direktno ubrizgavanje benzina, elektronska kontrola rada turbokompresora i, takođe, precizno elektronsko upravljanje radnim procesom motora, omogućilo je da nove generacije turbopunjenih oto motora praktično rade sa istim stepenom sabijanja kao i usisni motori. Današnji turbopunjeni oto motori mahom imaju poboljšanu ekonomičnost u odnosu na usisne motore iste snage, koji su veće radne zapremine i većih dimenzija, zbog čega su slabiji u pogledu mehaničkih gubitaka [1]. „Down sizing“ zbog toga opravdano znači meru za poboljšanje ekonomičnosti motora. Ako bi se posmatrala globalna ekonomičnost, koja osim potrošnje goriva motora uzima u obzir i potrošnju sirovina i energije pri proizvodnji motora, onda su prednosti „Down sizing“-a još izraženije.

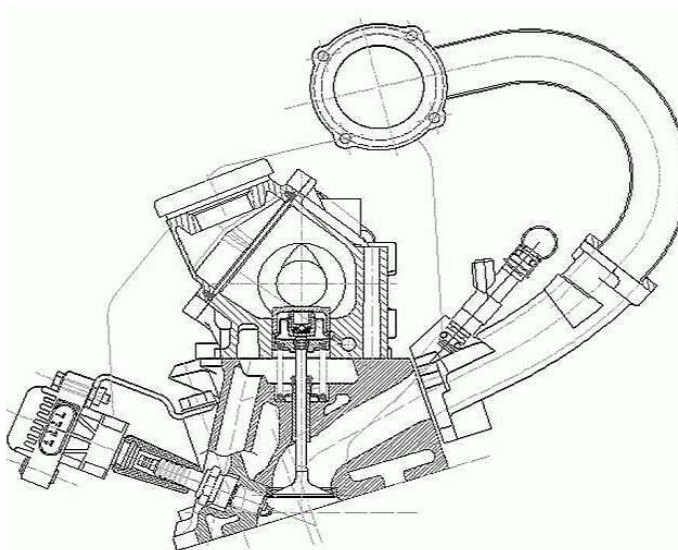
Cilj projekta primene turbopunjenja na motor DMB 1.4 l, koji je realizovan u saradnji fabrike DMB i Mašinskog fakulteta u Beogradu, uz finansijsku podršku Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru Nacionalnog programa energetske efikasnosti (NPEE), bio je da se razviju prototipska rešenja i ispitaju mogućnosti i limiti postojećeg motora.

2. PROTOTIPSKO REŠENJE TURBOPUNJENOG MOTORA 1.4 l

Baza za prototip turbopunjenog motora 1.4 je, tzv. »inovirani motor« DMB, kod koga se najveći broj inovacija odnosi na sistem razvoda: bregasto vratilo od sivog liva sa odbelom i povećane visine izdizanja ventila, novi ventili smanjenog prečnika stabla, nove ventilske opruge, hidraulični kompenzatori zazora ventila, novi usisni sistem, itd. Detalji primenjenih inovacija na usisnom motoru publikovani su ranije [2], a na sl. 1 prikazan je presek glave inoviranog motora. Osnovne karakteristike turbomotora 1.4 date su u tabeli 1.

Tabela 1-Osnovne karakteristike turbomotora

Proizvođač i tip	DMB 202. A.
Vrsta motora	4t, oto, vod. hlad.
Hod i prečnik	67,4 / 80,5 mm
Stepen sabijanja	9,2
Upravljanje radom usisnog motora	Bosch M 4.6
Upravljanje radom turbomotora	Razvijen sistem sekvencijalnog MPI ubrizgavanja i paljenja
Turbokompresor	IHI RHB 52
Kompresor	BRL 348 C
Turbina	PT9 i PT12

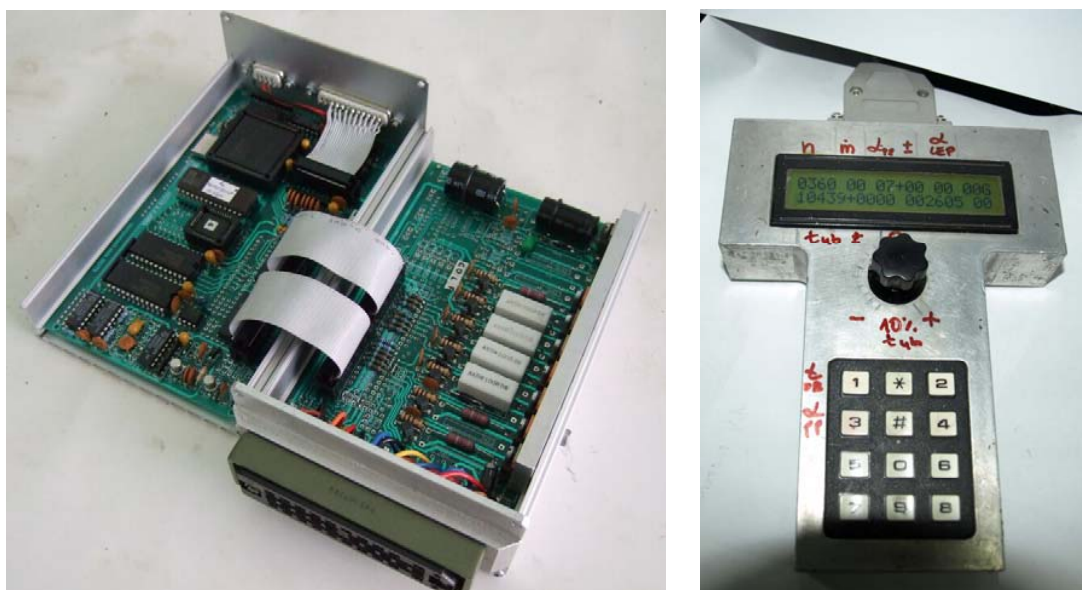


Sl. 1-Presek glave inoviranog motora

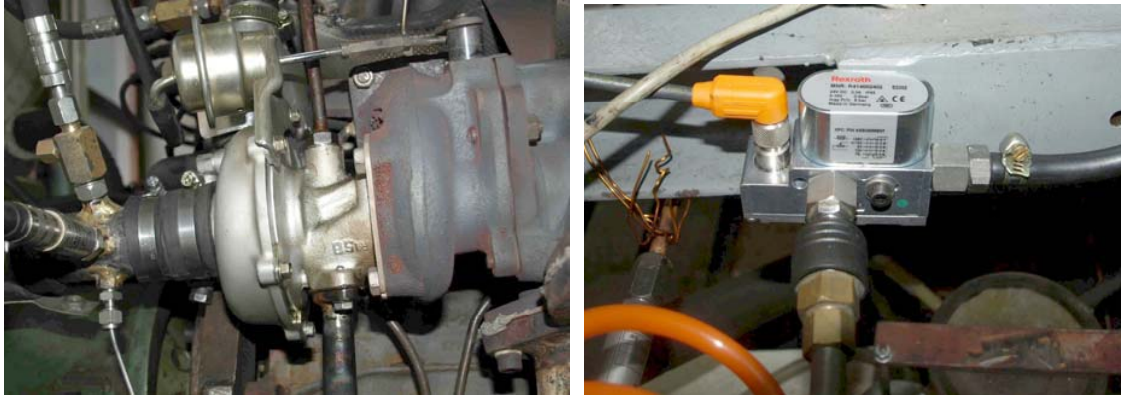
Na bazi kompjuterske simulacije radnog procesa turbomotora usvojena je primena turbokompresora japanske firme IHI sa regulacijom pritiska pomoću **Zaobilaznog Ventila Turbine - ZVT** (waste gate) i sa međuhlađenjem sabijenog vazduha [1]. Iako je kompjuterska simulacija turbomotora vršena sa smanjenim stepenom sabijanja $\varepsilon = 8,5$, kod definisanja prototipa ipak je zadržan isti stepen sabijanja kao kod usisnog motora od 9,2, sa ciljem ostvarenja maksimalne ekonomičnosti turbomotora. Svesno je, dakle, prihvaćena činjenice da će time ograničenje porasta pritiska u kompresoru biti veće i time i snaga turbomotora manja. Eksperimentalna ispitivanja su izvršena sa dva kućišta turbine, sa odnosom protočne površine i radijusa $A/R=9$ i $A/R=12$.

Postojeći elektronski sistem regulacije ubrizgavanja i paljenja usisnog motora nije bilo moguće prilagoditi radu turbomotora ni po kapacitetu ciklusne količine goriva ni po ulaznim regulacionim veličinama i regulaciji pretpaljenja. Zbog toga je razvijen prototip sistema sekvencijalnog ubrizgavanja benzina i paljenja, koji je pored automatske regulacije na bazi ulaznih veličina prilagođenih turbomotoru i mapa podataka, omogućavao i vrlo jednostavnu korekciju upravljačkih parametara sa konzole u toku rada motora [1]. Osnovne karakteristike razvijenog sistema upravljanja radom turbomotora (sl. 2) su:

- Sekvencijalno ubrizgavanje goriva; za razliku od originalnog sistema upravljanja kod koga je primenjeno „grupno ubrizgavanje“ (simultano za 1. i 4. cil. i za 2. i 3. cil.) u ovom slučaju ubrizgavanje goriva u svaki cilindar je na početku takta usisavanja.
- Pozicija kolenastog vratila i broj obrtaja motora se definišu preko induktivnog senzora u sprezi sa zamajcem motora (120 zuba, rezolucija $3^{\circ}KV$, softverski deobom vremena – rez. $1^{\circ}KV$).
- Opterećenje motora se definiše na bazi merenja masenog protoka vazduha (Hot film anemometar)
- Primenjeni su brizgači povećanog kapaciteta Bosch 0 280 150 701, sa statičkim kapacitetom $263 \text{ cm}^3/\text{min}$ (originalni brizgači su Bosch 0280 150 555, sa statičkim kapacitetom $109 \text{ cm}^3/\text{min}$)
- Sistem je „otvorenog tipa“ tj. omogućava neposredne intervencije i korekcije ubrizgane količine goriva i ugla pretpaljenja sa konzole (sl. 2 – desno). Na taj način je vršena precizna optimizacija procesa na svakom radnom režimu motora.



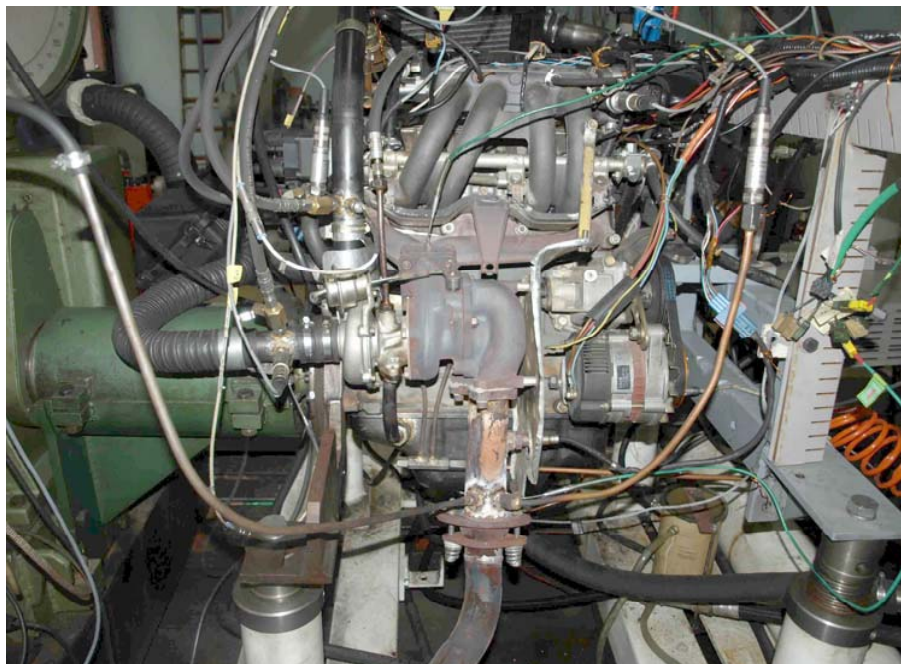
Sl. 2- Razvijeni sistem elektronskog upravljanja radom turbomotora; levo - elektronska upravljačka jedinica; desno – konzola za korekciju upravljačkih parametara



Sl. 3- Sistem za kontrolu pritiska natpunjenja; levo - ZVT uređaj; desno – elektronski upravljani regulator pritiska.

Originalni mehanički ZVT (Waste gate) ograničava pritisak natpunjenja otvaranjem „by pass“ kanala kojim izduvni gasovi struje mimo lopatica turbine. Pritisak u usisnom sistemu je ujedno i upravljački pritisak koji se dovodi u membransku komoru ZVT uređaja. Mada je prednapon opruge ZVT uređajaja moguće regulisati i time i pritisak natpunjenja, minimalna granična vrednost je oko 1,6 bar. Ovakva konfiguracija nije pogodna za istraživanje i optimizaciju rada sistema zbog čega je mehanička regulacija rada ZVT isključena i razvijen je i primenjen sistem elektronskog upravljanja radom ZVT na bazi elektronski modulisanog pritiska iz pneumatske instalacije (regulator pritiska BOSH Rexroth R414002402). Na taj način je porast pritiska u kompresoru mogao biti kontrolisan sa konzole u svakoj radnoj tački motora. Na sl. 3 prikazani su elementi sistema za kontrolu pritiska natpunjenja motora.

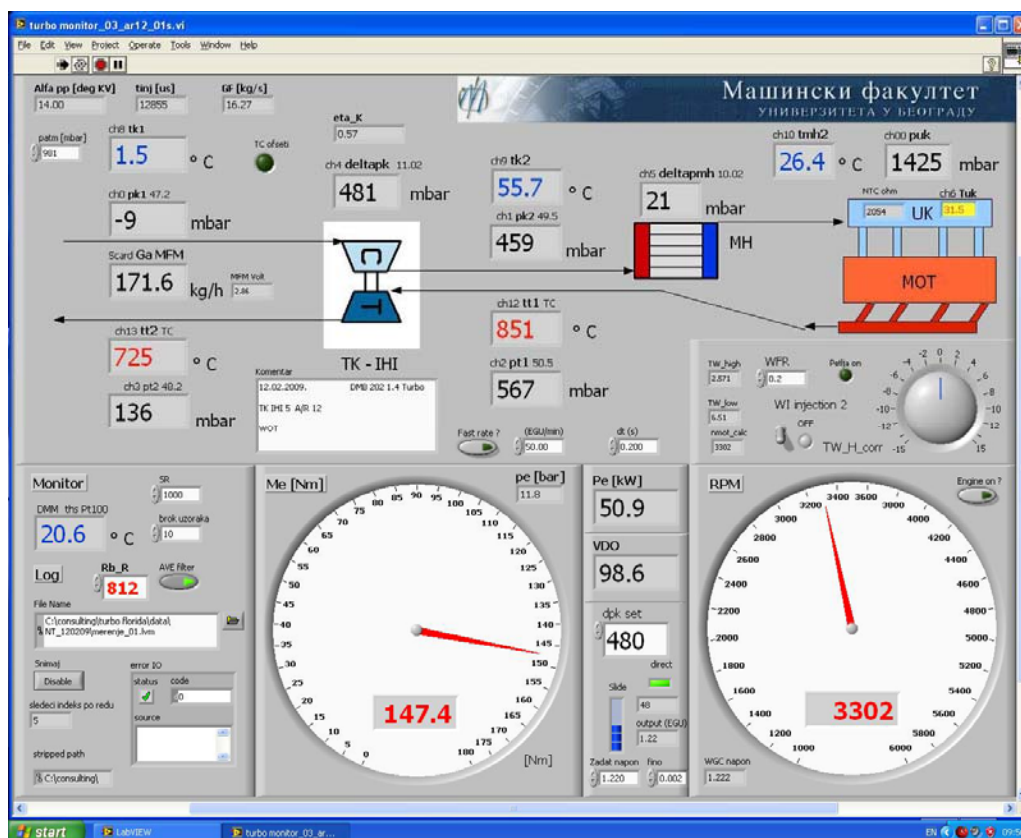
Primena svih ovih sistema imala je za cilj optimizaciju radnog procesa i ispitivanje maksimalnih mogućnosti turbomotora u pogledu razvijenih performansi i ekonomičnosti. Na sl. 4 prikazan je prototip turbomotora DMB 1.4 na opitnoj instalaciji koja je specijalno u tu svrhu izgrađena u centru za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu.



Sl. 4- Prototip turbomotora DMB 1.4 na probnom stolu u laboratoriji centra za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu

Kompletno eksperimentalno ispitivanje turbomotora na probnom stolu je kompjuterizovano i upravljano pomoću merno-akvizicionog i upravljačkog sistema organizovanog oko National Instruments PXI platforme. Program za upravljanje procesom merenja je realizovan tako da omogući i sveobuhvatnu vizuelnu kontrolu ne samo osnovnih mernih veličina već i kompletnog toka fluida kroz turbomotor (sl. 5).

Za detekciju detonacije korišćen je "flat-type response" senzor detonacije postavljen na bloku motora. Za obradu ovog signala razvijen je poseban softver za generisanje spektrograma primenom STFT transformacije (*Short-time Fourier transform*).



Sl. 5- Izgled ekrana merno-akvizicionog i upravljačkog sistema

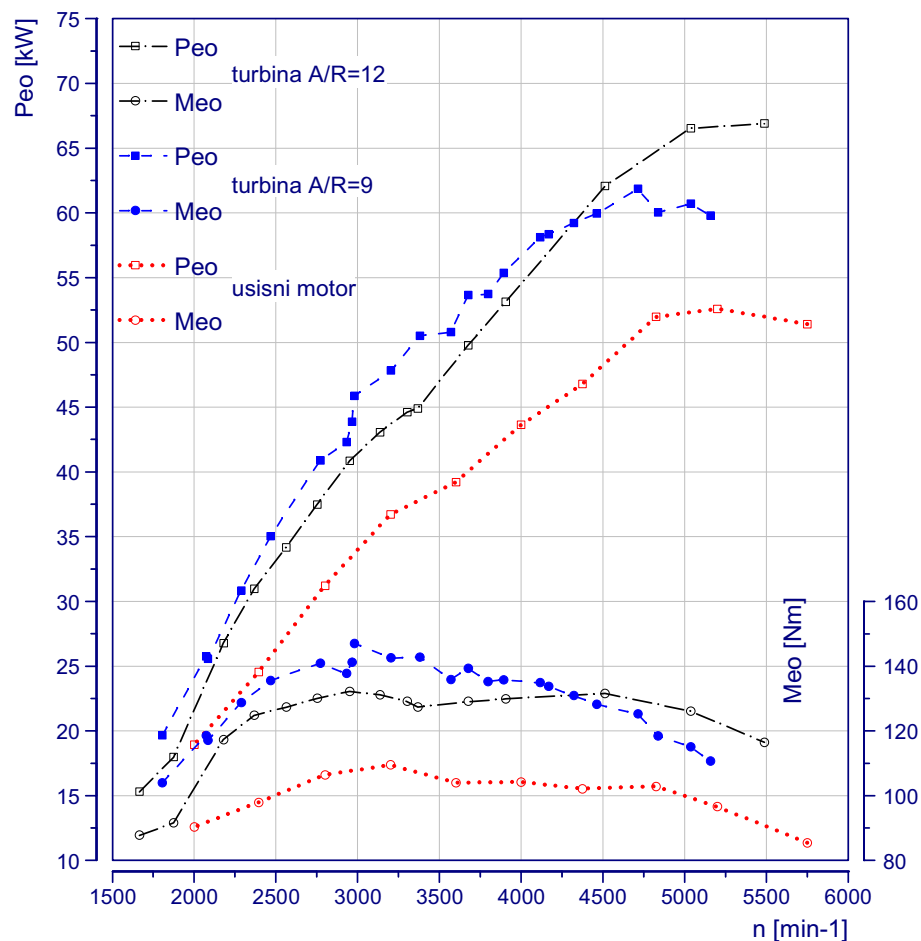
3. REZULTATI ISPITIVANJA PROTOTIPA TURBOMOTORA

Kao što je već ranije navedeno osnovni problemi primene natpunjenja kod oto motora su pojava detonantnog sagorevanja i visoke temperature izduvnih gasova koje mogu ugroziti kućište turbine i turbinsko kolo turbokompresora. Problem je složen i zbog činjenice da je delovanje jednog od osnovnih regulacionih parametara kojim se može uticati na radni proces – ugla pretpaljenja - u koliziji u odnosu na pomenute nepoželjne pojave. Smanjenjem pretpaljenja se efikasno otklanja opasnost od detonacije ali se povećava temperatura izduvnih gasova na ulazu u turbinu i obrnuto. Zbog toga su ispitivanja turbomotora izvedena tako da je na svakom radnom režimu podešavan maksimalni porast pritiska u kompresoru koji je omogućavao bezbedan rad motora. Pri tome je na punom opterećenju podešavana bogatija smeša u odnosu na usisni motor ($\lambda=0,8-0,85$), kako bi se smanjila opasnost od detonacije a ugao pretpaljenja regulisan je tako da se izbegne detonacija i obezbedi temperatura izduvnih gasova na ulazu u turbinu ispod dozvoljenih 900°C. Ukoliko ovo nije bilo moguće, intervenisano je smanjenjem porasta pritiska natpunjenja.

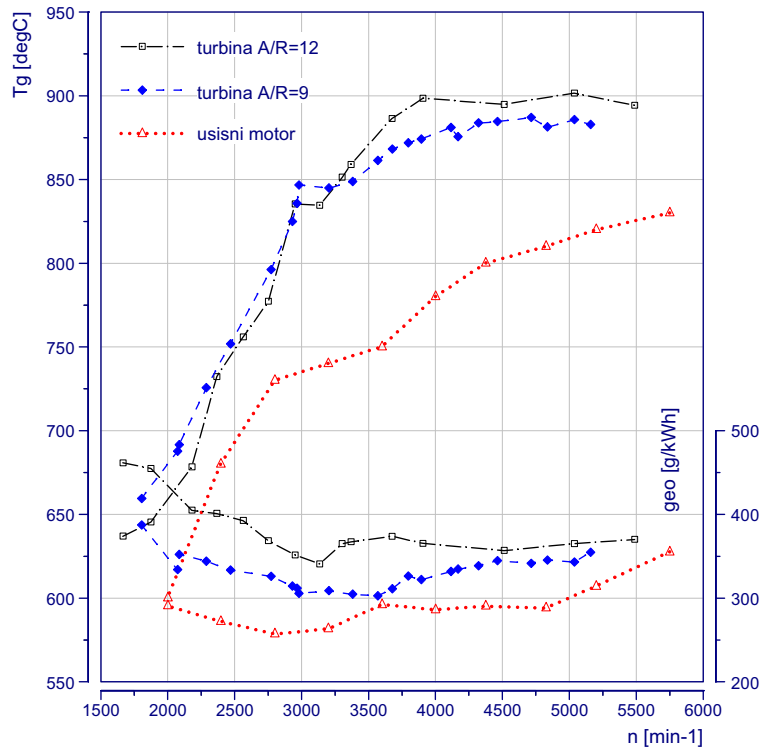
Na sl. 6 prikazana su efektivna snaga P_{eo} i obrtni moment M_{eo} a na sl. 7 specifična efektivna potrošnja goriva g_e i temperatura izduvnih gasova na ulazu u turbinu t_g na punom opterećenju motora (kriva pune snage) za usisni motor i ispitivane verzije turbomotora: sa kućištem turbine $A/R=9$ i $A/R=12$. Vidi se da se veće vrednosti obrtnog momenta postižu sa kućištem $A/R=9$ (max. moment od oko 145 Nm pri oko 3000 min^{-1}), dok se veća maksimalna snaga od oko 68 kW postiže sa kućištem $A/R=12$.

Kao što se na sl. 7 može videti osnovni problem je previsoka temperatura izduvnih gasova na ulazu u turbinu pri visokim režimima rada motora. Ukoliko se temperatura smanji povećanjem ugla pretpaljenja, dolazi se u oblast detonacije. Na sl. 8 prikazani su stepen porasta pritiska u kompresoru (p_2/p_1) i izmerene vrednosti izentropskog stepena korisnosti kompresora η_{ks} . Zbog napred navedenih problema porast pritiska je u kompresoru na višim režimima rada morao biti bitno smanjen, posebno sa turbinskim kućištem $A/R=9$, gde je neophodno veće smanjenje pritiska natpunjenja na visokim režimima rada motora.

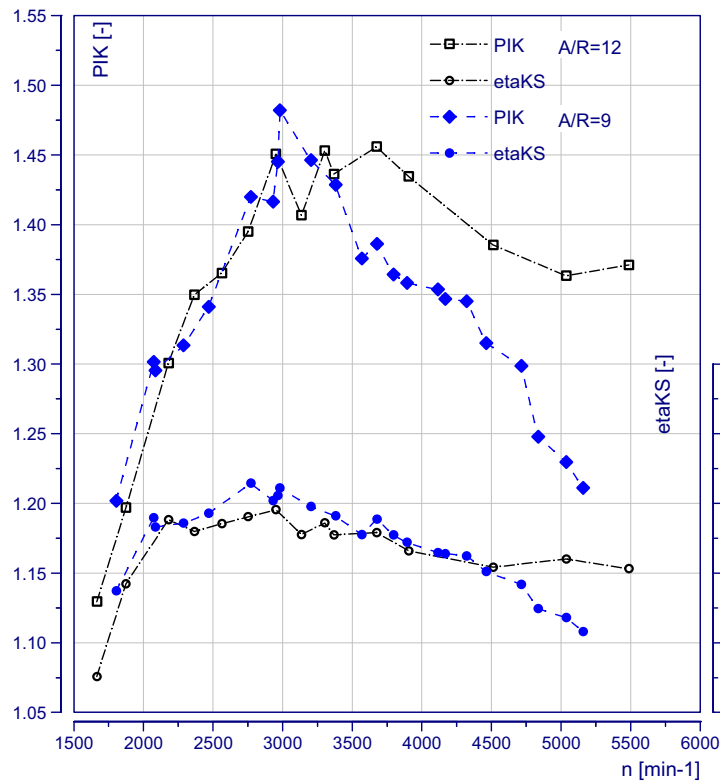
Specifična efektivna potrošnja goriva je veća kod obe verzije turbomotora u odnosu na usisni motor, što je pre svega posledica znatno bogatije smeše kod turbomotora ($\lambda=0,8-0,85$) koja je svesno podešena kako bi se izbegla detonacija. Ova činjenica svakako nije povoljna ali u suštini potrošnja goriva na spoljnoj brzinskoj karakteristici (pri punom opterećenju) i nije merodavna za globalnu ekonomičnost motora i automobila u eksploataciju, gde su neuporedivo češći i dugotrajniji režimi parcijalnog opterećenja.



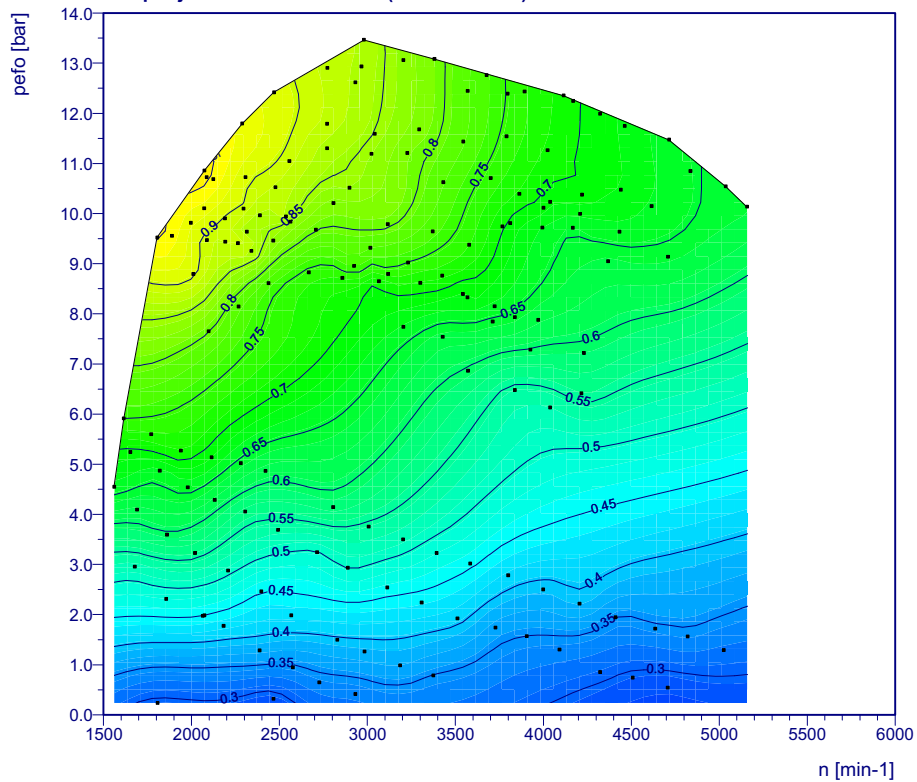
Sl. 6 – Kriva pune snage usisnog i ispitivanih verzija turbomotora;
 P_{eo} - efektivna snaga; M_{eo} - obrtni moment



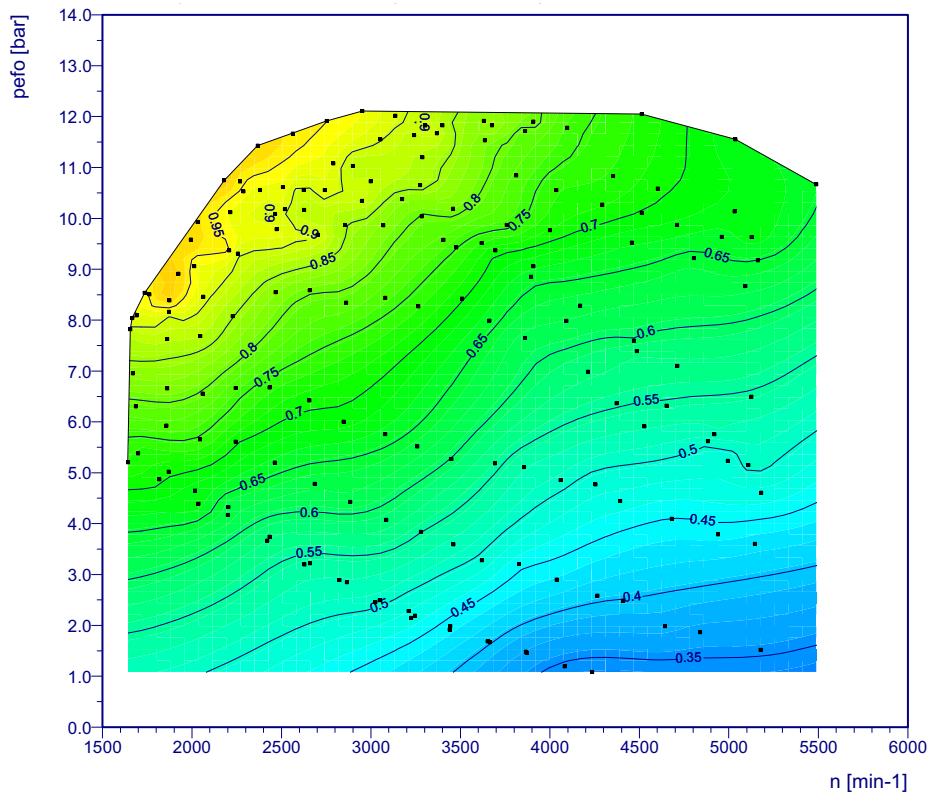
Sl. 7 – Specifična efektivna potrošnja goriva g_{eo} i temperatura izduvnih gasova t_g na krivjoj pune snage za bazni usisni motor i ispitivane verzije turbomotora.



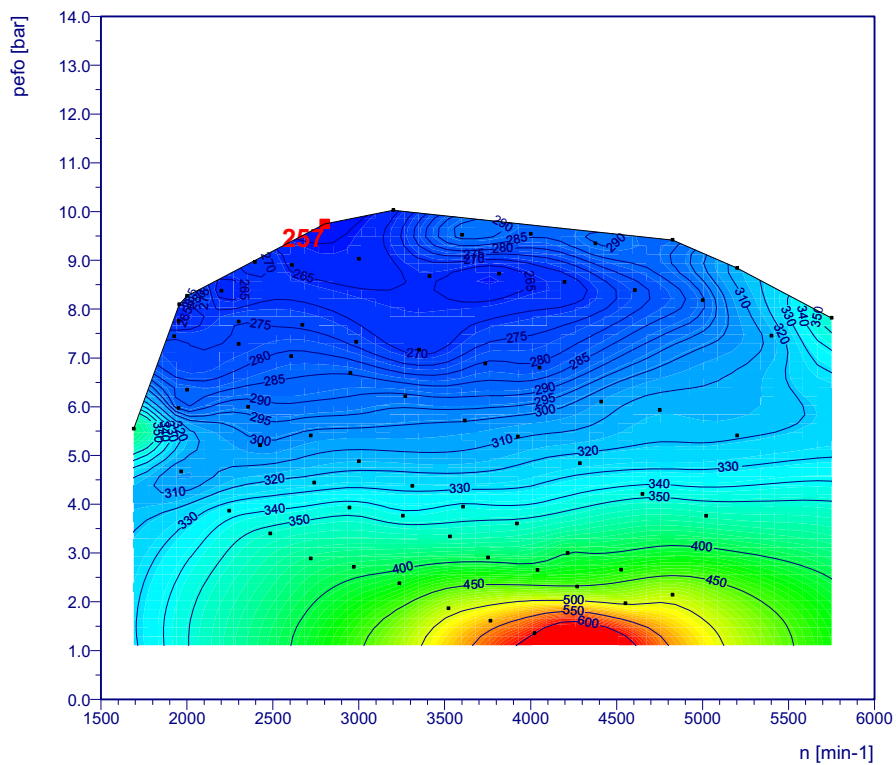
Sl. 8 – Porast pritiska u kompresoru p_2/p_1 (PIK) i izentropski stepen korisnosti kompresora η_{KS} (η_{KS}) na krivjoj pune snage za ispitivane verzije turbomotora.



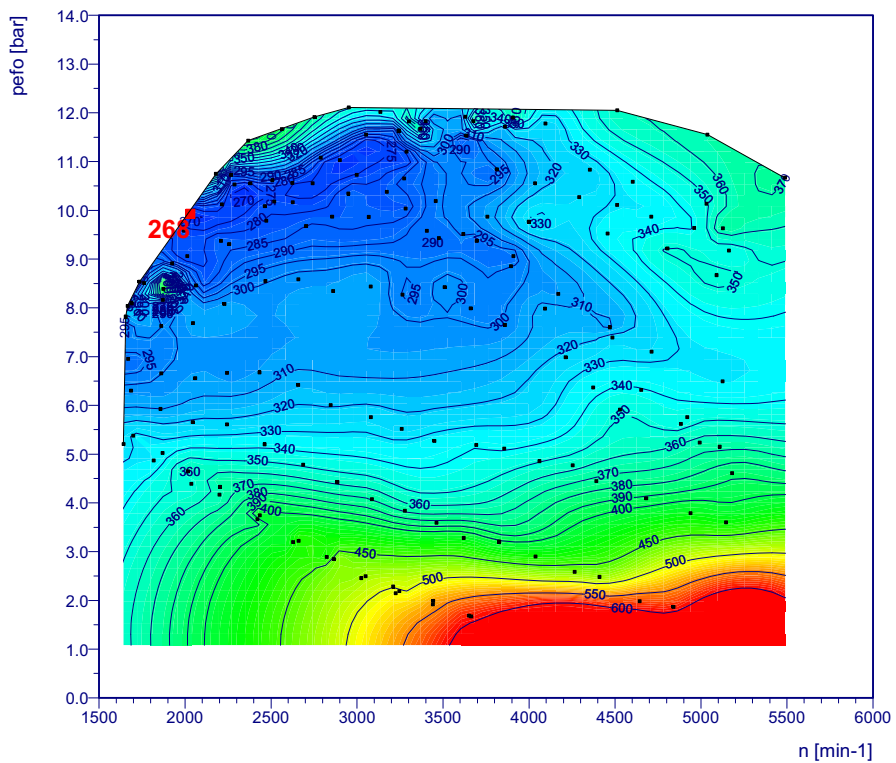
Sl. 9 – Odnos pritiska u usisnom i izduvnom kolektoru motora p_u/p_i u celoj radnoj oblasti (univerzalni dijagram) za turbomotor sa kućištem turbine $A/R=9$



Sl. 10 – Odnos pritiska u usisnom i izduvnom kolektoru motora p_u/p_i u celoj radnoj oblasti (univerzalni dijagram) za turbomotor sa kućištem turbine $A/R=12$



Sl. 11-Univerzalni dijagrami specifične efektivne potrošnje goriva g_e za usisni motor.



Sl. 12-Univerzalni dijagrami specifične efektivne potrošnje goriva g_e turbopunjeni motor sa turbinskim kućištem $A/R=12$

Na sl. 9 i sl. 10 prikazani su odnosi pritiska u usisnom i izduvnom kolektoru za obe verzije turbomotora, $AR=9$ i $A/R=12$. Vidi se da je i pri punom otvoru leptira (na krivoj pune snage) pritisak u usisnom kolektoru niži nego i izduvnom kolektoru ($p_u/p_i < 1$) što je posledica izraženog ograničenja porasta pritiska natpunjenja. Ovo znači da je rad izmene radne materije kod turbomotora negativan, ali svakako manji nego kod usisnog motora. Odnos pritiska se kod verzije $A/R=12$, gde je prigušenje izduva manje, na punom opterećenju približava vrednosti 1 na nižim brojevima obrtaja (rad izmene radne materije vrlo mali), i uopšte je niži u celoj radnoj oblasti. Zbog toga je i potrošnja goriva u celoj radnoj oblasti niža kod verzije $A/R=12$ (osim na punom opterećenju gde je povećana potrošnja posledica regulacije – bogate smeše).

Na sl. 11 prikazan je univerzalni dijagrami specifične efektivne potrošnje za usisni motor a na sl. 12 za turbomotor $A/R=12$. Pri punom opterećenju potrošnja goriva je niža kod usisnog motora uglavnom zbog činjenice da je kod turbomotora morala biti podešena bogatija smeša i manji uglovi pretpaljenja. Međutim, na nižim opterećenjima, kada su oba motora radila sa stehiometrijskom smešom (zahtev 3-way katalizatora), potrošnja goriva je približno ista. Međutim, ovakvo upoređenje nije sasvim adekvatno, jer je turbomotor znatno veće snage. Ako bi se upoređenje vršilo sa usisnim motorom iste snage, koji bi morao biti veće radne zapremine i dimenzija, može se pretpostaviti da bi prednost u ekonomičnosti (potrošnji goriva) bila na strani turbomotora, prvenstveno zbog boljeg stepena mehaničkog iskorišćenja.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega napred iznetog može se zaključiti sledeće:

1. Postojeća konstrukcija komore sagorevanja motora ne pruža dovoljnu otpornost prema detonaciji, pa je kod turbomotora sa nesmanjenim stepenom sabijanja (9,2) vrlo ograničen porast pritiska. Mogućnost otklanjanja detonacije smanjenjem pretpaljenja je na višim brojevima obrtaja ograničena porastom temperature izduvnih gasova na ulazu u turbinu.

2. U verziji turbomotora sa turbinskim kućištem $A/R=12$ za sada je ostvareno bezbedno povećanje snage za oko 30% i obrtnog momenta motora za oko 20%. Ipak, i pored osteljivosti komore sagorevanja motora na detonaciju, čini se da bi daljom optimizacijom regulacionih parametara i manjim saniženjem stepena sabijanja motora, bio omogućen veći porast pritiska i time i snage i obrtnog momenta turbomotora.

3. Ekonomičnost turbomotora je na nivou baznog usisnog motora. Može se pretpostaviti da bi u poređenju sa usisnim motorom iste snage prednost bila na strani turbomotora. Ovo tim pre, ako se uzme u obzir globalna ekonomičnost, koja osim potrošnje goriva motora uzima u obzir i potrošnju sirovina i energije pri proizvodnji motora.

LITERATURA

- [1] Tomić, M., Petrović, S., Cvetić, M., Jovanović, Z., Popović, S., Miljić, N., Nestorović, M., Grubiša, M. – “Usavršavanje domaćih benzinskih automobilskih motora radi poboljšanja energetske i ekološke karakteristika”, NPEE 290025 – Elaborati o realizaciji projekta nakon prve i druge godine istraživanja, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [2] Jurković, T., Petrović, S., Tomić, M., Čupurdija, A., Uremović, Š., Revitalization of 1.4 lit. DMB Engine, JU-03050, Internacionalni naučno-stručni skup «Nauka i motorna vozila '03, Beograd, 2003.