

PRIMENA TURBOPUNJENJA NA MOTORU DMB 1.4 MPI

Miroljub Tomić¹, Slobodan Popović², Nenad Miljić³, Stojan Petrović⁴, Vlada Stajić⁵

Rezime: U radu su prikazani rezultati ispitivanja prototipa turbopunjenog oto motora zapremine 1.4 l, proizvodnje DMB. Za turbomotor je razvijen elektronski sistem za upravljanje sistemom MPI ubrizgavanja goriva i paljenja. Upravljanje zaobilaznim ventilom turbine (waste gate) takođe je vršeno preko elektronskog sistema, kako bi se omogućila kontrola porasta pritiska kompresora na pojedinim režimima rada motora. U istraživačke svrhe takođe je razvijen i sistem za ubrizgavanje vode u usisni kolektor motora sa ciljem sniženja temperature ciklusa radi otklanjanja opasnosti od detonacije i sniženja temperature izduvnih gasova na ulazu u turbinu.

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

TURBOCHARGING APPLICATION ON DMB 1.4 I MPI SPARK IGNITION ENGINE

Abstract: The paper presents the results of the turbocharged DMB 1.4 l spark ignition engine prototype testing. The experimental electronic fuel injection and ignition control system for the prototype of turbocharged engine has been developed as well. The turbine waste gate was controlled by electronic control system in order to optimize the engine boost pressure at every operating point. The system of water injection into the engine intake manifold was also developed and applied in some operating points to prevent the knock and decrease the temperature of exhaust gases on turbine inlet.

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

1. UVOD

Smanjenje veličine (radne zapremine) je danas kod oto motora jedan od najatraktivnijih načina za širenje game snage motora uz zadržavanje iste ili čak poboljšanje ekonomičnosti. To smanjenje veličine ili u svetu poznato kao »down sizing« u stvari predstavlja primenu turbopunjenja na oto motoru. Danas praktično svi renomirani proizvođači automobilskih oto motora imaju razvijene ili razvijaju verzije turbopunjenih oto motora, i to ne samo kao ekskluzivne verzije motora visoke klase i performansi već i relativno malih motora kod kojih je u prvom planu ekonomičnost.

Primena turbopunjenja kod oto motora je vrlo osjetljiva i skopčana sa daleko više problema nego kod dizel motora, gde je turbopunjenje danas praktično

¹ Prof. dr Miroljub Tomić, Beograd, Mašinski fakultet (mtomic@mas.bg.ac.rs)

² Mr Slobodan Popović, Beograd, Mašinski fakultet (spopovic@mas.bg.ac.rs)

³ Mr Nenad Miljić, Beograd, Mašinski fakultet (nmiljic@mas.bg.ac.rs)

⁴ Prof. dr Stojan Petrović, Beograd, Mašinski fakultet (spetrovic@mas.bg.ac.rs)

⁵ Dipl. Ing Vlada Stajić, Beograd, Mašinski fakultet (vstajic@mas.bg.ac.rs)

standardna tehnologija. Osnovni problem je opasnost od detonantnog sagorevanja, a takođe i visoke temperature izduvnih gasova mogu biti problematične za kućište i lopatice turbine. Zbog toga se kod oto motora moraju preduzeti sve mere da se snize temperature ciklusa, što praktično znači vrlo ograničen porast pritiska u kompresoru i obavezna primena međuhlađenja. Često ni ovo nije bilo 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, kako bi se otklonila opasnost od detotacije. Naravno, navedene 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.

Razvojem novih tehnologija kod oto motora, 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 uopšte većih dimenzija, tako da su su slabiji u pogledu mehaničkog stepena korisnosti [1]. „Down sizing“ zbog toga opravdano znači meru za poboljšanje ekonomičnosti. 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.

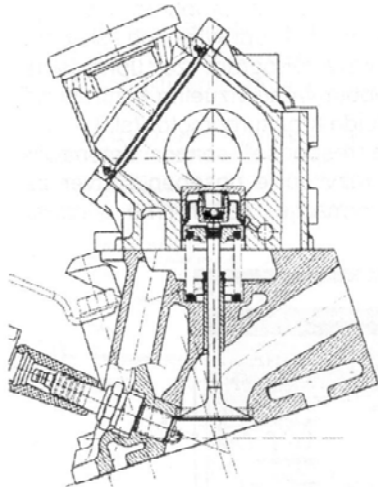
Cilj projekta primene turbopunjenja na motor DMB 1.4 l, koji je realizovan u saradnji fabrike DMB i Mašinskog fakulteta u Beogradu, uz finansijsku podršku Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru nacionalnog programa energetske efikasnosti, bio je da se razviju prototipska rešenja i ispitaju mogućnosti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

2. PROTOTIP TURBOMOTORA 1.4 I EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

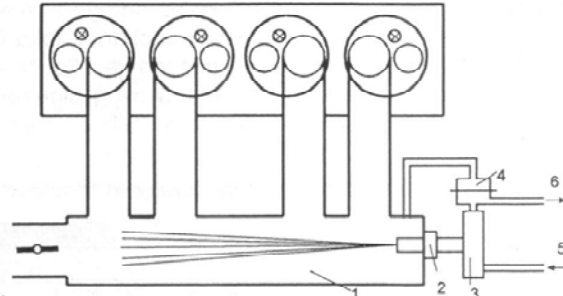
Prototip turbomotora 1.4 izveden je iz usisnog, tzv. »inoviranog motora« DMB, kod koga se najveći broj izmena odnosi na sistem razvoda: novo bregasto vratilo od sivog liva sa odelom i povećane visine izdizanja; novi ventili smanjenog prečnika stabla i nove ventilske opruge; hidraulični kompenzatori zazora ventila 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. Na bazi kompjuterske simulacije radnog procesa turbomotora usvojena je primena turbokompresora japanskog proizvođača IHI sa regulacijom pomoću zaobilaznog ventila turbine - ZVT (waste gate) i međuhlađenjem.

Iako je preliminarna kompjuterska simulacija radnog procesa tuomotora vršena sa smanjenim stepenom sabijanja $\epsilon=8,5$, kod definisanja prototipa za prva ispitivanja ipak je zadržan isti stepen sabijanja kao kod usisnog motora od 9,2. Razlog je da se maksimalno potencira ekonomičnost turbomotora, makar i po cenu manjeg porasta pritiska u kompresoru i manje snage turbomotora, s tim da se eventualna opasnost od detonacije predupredi pažljivim vođenjem radnog procesa (regulacija pritiska kompresora, sastava smeše i ugla pretpaljenja).

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena sa dva kućišta turbine, sa odnosom protočne površine i radijusa $A/R=9$ i $A/R=12$.



Sl.1 Presek glave inoviranog motora



Sl.2 Šematski prikaz eksperimentalnog sistema ubrizgavanje vode u usisni kolektor turbomotora

Tabela 1-Osnovne karakteristike turbomotora

Proizvođač i tip	DMB 202. A.
Vrsta motora	4t, oto, vod. hlađ.
Hod i prečnik klipa	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	PT12

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.

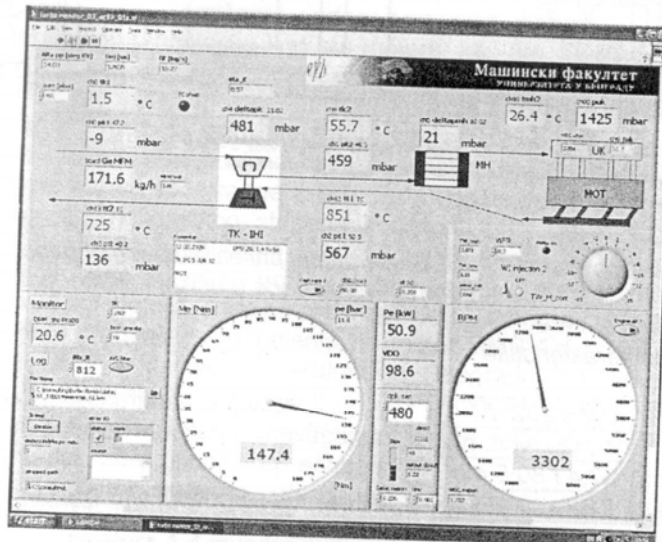
Mehanička regulacija rada ZVT je isključena i razvijen je i primenjen sistem elektronskog upravljanja radom ZVT na bazi elektronski modulisanog pritiska iz pneumatske instalacije. Na taj način je porast pritiska u kompresoru mogao biti kontrolisan sa konzole u svakoj radnoj tački motora.

U eksperimentalne svrhe razvijen je i primenjen na prototipu turbomotora i sistem za ubrizgavanje vode u usisni kolektor motora (sl.2). Cilj je da se na kritičnim režimima rada motora snize maksimalne temperature kako bi se otklonila opasnost od detonacije i takođe snize temperature izduvnih gasova na ulazu u turbinu do max. dozvoljenih 900 °C. Ubrizgavanje vode na kritičnim režimima rada je regulisano u opsegu 10-20% ubrizgane količine goriva.

Primena svih ovih sistema imala je za cilj optimizaciju radnog procesa i ispitivanje maksimalnih mogućnosti turbomotora u pogledu razvijenih performansi i ekonomičnosti.

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.3).

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.3 Izgled ekrana merno-akvizicionog i upravljačkog sistema

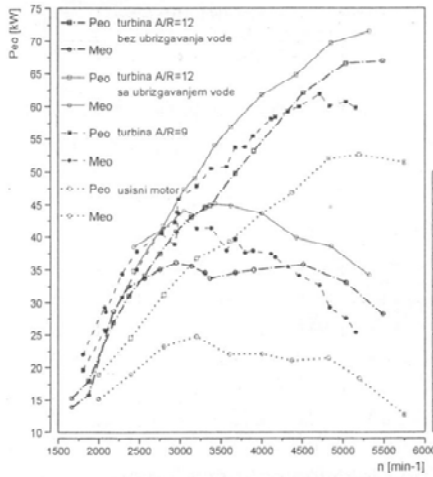
3. NEKI REZULTATI ISPITIVANJA TURBOMOTORA

Ispitivanja turbomotora su 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 nešto 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.

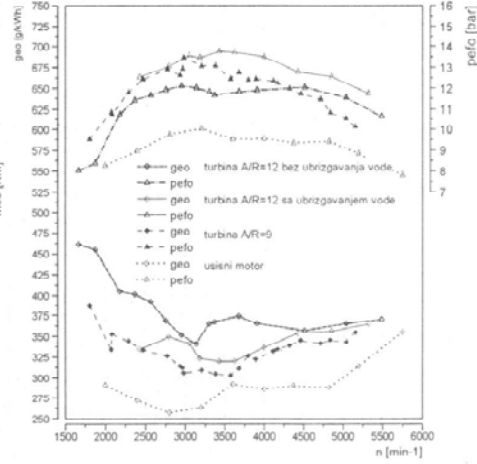
Na sl.4 uporedno su prikazane spoljne brzinske karakteristike usisnog motora i ispitivanih verzija turbomotora: sa kućištem turbine $A/R=9$, $A/R=12$ i $A/R=12$ sa ubrzgavanjem vode na kritičnim režimima rada. Na sl.5 prikazani su stepen porasta pritiska u kompresoru (p_2/p_1), izmerene vrednosti izentropskog stepena korisnosti kompresora i temperatura izduvnih gasova na ulazu u turbinu. Vidi se da se bolje karakteristike motora postižu sa turbinskim kućištem $A/R=12$. Maksimalno je u verziji sa ubrzgavanjem vode postignuta snaga od oko 72 kW i obrtni moment od 150 Nm. Nažalost, bez ubrzgavanja vode moguće je ostvariti znatno skromnije rezultate ($P_e \approx 67$ kW i $M_e \approx 135$ Nm). Kao što se 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. Zbog toga je u verziji bez ubrizgavanja vode porast pritiska u kompresoru na višim režimima rada morao biti bitno smanjen, posebno sa turbinskim kućištem A/R=9.

EFEKTIVNA SNAGA [P_{eo}] I EFEKTIVNI OBRтни MOMENT [M_{eo}] U SPOLJNOJ BRZINSKOJ KARAKTERISTICI

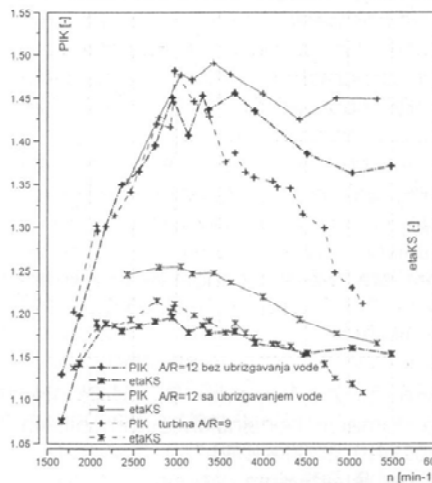


SPEC. EF. POTROŠNJA GORIVA [g_{eo}] I SR. EF. PRITISAK [p_{efo}] U SPOLJNOJ BRZINSKOJ KARAKTERISTICI

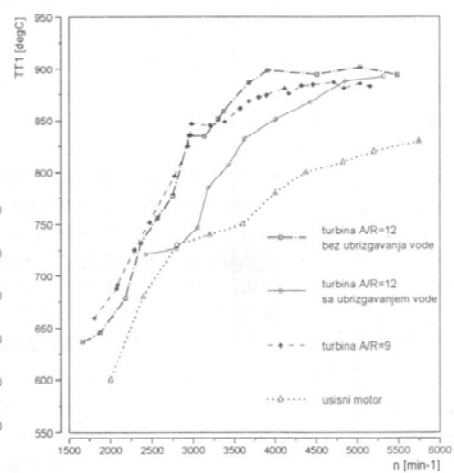


Sl.4 Spoljne brzinske karakteristike usisnog i ispitivanih verzija turbomotora

STEPEN PORASTA PRITISKA U KOMPRESORU [PIK] I IZENTROPSKI STEPEN KORISNOSTI KOMPRESORA [eta_{KS}]

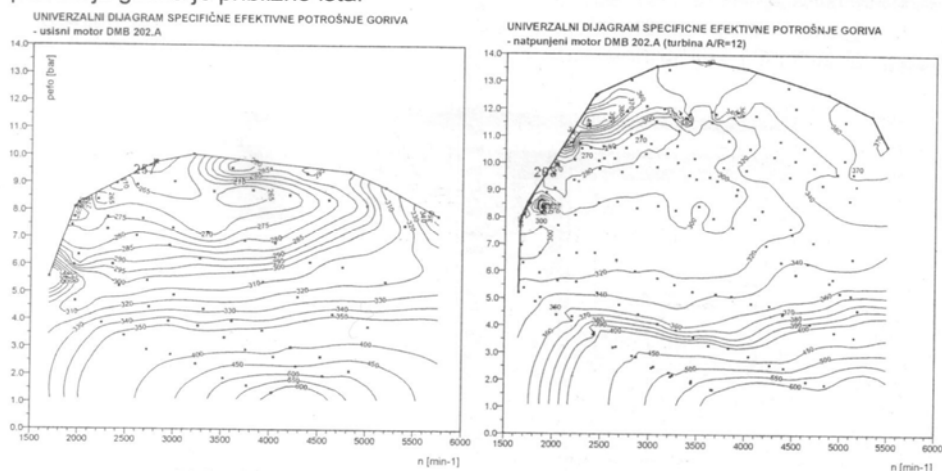


TEMPERATURA IZDUVNIH GASOVA U SPOLJNOJ BRZINSKOJ KARAKTERISTICI



Sl.5 Porast pritiska, izentropski stepen korisnosti kompresora i temperatura izduvnih gasova na spoljnoj brzinskoj karakteristici kod ispitivanih verzija turbomotora

Na sl.6 su prikazani univerzalni dijagrami specifične efektivne potrošnje za usisni motor i turbopunjeni A/R=12. Pri punom opterećenju potrošnja goriva je niža kod usisnog motora (sl.4-levo), 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 (zatev 3-way katalizatora), potrošnja goriva je približno ista.



Sl.6 Univerzalni dijagrami specifične efektivne potrošnje goriva

4. ZAKLJUČAK

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. Situacije se bitno može popraviti primenom tehnologije ubrizgavanja vode u usisni kolektor motora radi sniženja temperature.

2. Bez ubrizgavanja vode moguće je ostvariti bezbedno povećanje snage za oko 28% i obrtnog momenta motora za oko 23%, dok se sa ubrizgavanjem vode postiže povećanje oba parametra za oko 38% u odnosu na bazni usisni motor.

3. Ekonomičnost turbomotora je na nivou usisne verzije istog motora. Može se pretpostaviti da bi u poređenju sa usisnim motorom iste snage prednost bila na strani turbomotora.

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 energetskih i ekoloških karakteristika" – 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.