Dr Predrag Petrović,
dipl. inž.
Industrija motora Rakovica,
Beograd

MOGUĆA KONSTRUKCIONA REŠENJA DIZEL MOTORA SA ASPEKTA REDUKCIJE EMISIJE BUKE

UDC: 621.436-533

Rezime:

Savremeni razvoj dizel motora, pored mnogobrojnih poboljšanja u pogledu emisije izduvnih gasova, povećanja specifične snage, smanjenja potrošnje goriva, primene alternativnih materijala, i dr., prate i zahtevi za smanjenje emisije buke. Takav problem se, u osnovi, može rešiti: smanjenjem pobude, promenom odziva strukture i primenom akustičkih zaštita. Ispitivanjima koja su vršena u Industriji motora Rakovica ustanovljeni su dominantni izvori buke brzohodnog dizel motora. Na osnovu toga data su moguća konstrukciona poboljšanja radi smanjenja emisije buke.

Ključne reči: dizel motor, poboljšanje konstrukcije, buka, izolacija.

POSSIBLE CONSTRUCTIONAL SOLUTIONS FOR DIESEL MOTORS FROM THE ASPECT OF REDUCTION OF NOISE EMISSION

Summary:

Besides numerous improvements as to the emission of exhaust gases, increase in specific power, reduction in fuel consumption, application of alternative materials, fuels, etc., contemporary development of diesel engines is characterised also by the requests for reduction of noise emission. In principle, the approach to such a problem can be: by reducing the excitation, by changing the structural response, and by changing the acoustic protections. By means of tests carried out at IMR, dominant sources of noise of a high-speed diesel engine were established and on that basis possible design improvements and other solutions were given, with, a view to reducing noise emission.

Key words: diesel engine, design improvement, noise, isolation, excitation.

Uvod

Zbog ubrzanog razvoja industrije, saobraćaja, energetike i drugih delatnosti, u životnoj sredini je sve prisutniji problem buke, čije kontinualno impulsno ili neko drugo dejstvo nepovoljno utiče na ljude. Motor sa unutrašnjim sagorevanjem, kao pogonski agregat motornog vozila, predstavlja značajan izvor vibracija i buke, što se veoma nepovoljno

može odraziti na vozilo, vozača, putnike i okolinu. Procesom rada motora koji prate neuravnotežene inercijalne sile, neuravnoteženi momenti inercijalnih sila, promenljivi obrtni momenti, neujednačenost radnog procesa, vibriranje strukture i uređaja na motoru, neadekvatni elastični oslonci i dr., ostvaruju se nepovoljna dejstva motora na okolinu.

Kod motora motornih vozila vibracije se prenose na vozilo, pobuđujući

vibriranje elemenata njegove konstrukcije. Kod motornih vozila izraženi su i drugi vidovi vibracija, npr. usled uticaja podloge puta, kvaliteta i tipa pneumatika, što zavisi od oblika noseće konstrukcije i njene osetljivosti prema vibracijama. S obzirom na to da je motor primarni izvor buke motornih vozila, u poslednje vreme razvijeni su novi postupci, metode ispitivanja i konstruisanja radi smanjenja buke. U prošlosti se taj problem nije potencirao, jer redukcija buke zahteva nova materijalna ulaganja za koja nisu bili zainteresovani ni proizvođači ni korisnici. Međutim, propusti proizvođača u prošlosti danas se veoma negativno odražavaju uvođenjem zakonskih propisa u pogledu dozvoljenih granica nivoa buke, koji se nažalost veoma brzo menjaju u pogledu sve oštrijih zahteva, pa mnogi svetski proizvođači, a naročito domaći, taj korak ne mogu da prate. Zbog toga je pri stvaranju uslova za poboljšanje konstrukcije i optimizacije pojedinih delova i sklopova veoma važno utvrditi karakter osetljivosti delova na pobudu pri određenim definisanim režimima rada motora. Takva ispitivanja i utvrđivanja dominantnih zona motora koje emituju buku najvišeg intenziteta obavljana su u Industriji motora Rakovica na brzohodnom dizel motoru.

Mogući pristupi smanjenju emisije buke

Energija izazvana pobudama procesa generisanja zvučnih talasa prenosi se kroz delove sistema i dolazi do mesta gde se emituje u okolinu u vidu zvuka. Da bi se nivo emitovanog zvuka smanjio potrebno je izvršiti konstrukciona poboljšanja međusobnih odnosa pojedinih sklopova i komponentata motora. Da bi se prigušili

izvori poremećaja, putevi prenošenja i smanjila akustička emisija, mogući su sledeći osnovni pristupi:

1. Smanjenje pobude:
 - od procesa sagorevanja,
 - od mehaničkih udara pojedinih komponentata,
 - od usisnog i izduvnog sistema.
2. Promena odziva strukture:
 - primenom materijala sa većim unutrašnjim prigušenjem,
 - primenom odgovarajućih izolacionih materijala zidova i poklopaca,
 - povećanjem krutosti komponentata.
3. Primena akustičkih zaštita:
 - postavljanjem bliskih zaštita zidova bloka i korita (oblaganjem),
 - izolovanjem eventualno postojećih tunela (usisnih, izduvnih, za hlađenje i dr.),
 - izolovanjem motorskog prostora – kapslovanje.

Konkretna konstrukciona rešenja, koja mogu dovesti do pozitivnih trendova u navedena tri pravca, mogu biti:

- obezbediti minimalnu vrednost porasta pritiska u procesu sagorevanja, naročito kod dizel motora zbog većih stepena kompresije, pritisaka i temperatura u radnim procesima. Paljenje smeše električnom varnicom obezbeđuje kontinualan i blag porast pritiska, a prelaz iz kompresione linije u liniju sagorevanja je kontinualan i teško primetan. Kod dizel motora nakon perioda pritajenog sagorevanja pripremljene smeše i naglog porasta pritiska, prelaz iz kompresione u liniju sagorevanja je diskontinualan. Impuls pritiska preko onog koji može da se apsorbira promenom zapremine pretvara se u primarne zvučne talase;

- obezbediti ponovljivost iniciranja samopaljenja od cilindra do cilindra i od ciklusa do ciklusa;

- ograničiti tolerancije na svim zazorima ležajeva, uključujući i klipove. Habanje i drugi procesi treba da budu takvi da u toku radnog veka ove zazore održe na nivou koji je blizak nominalnim vrednostima;
- obezbediti potreban nivo dinamičke uravnoteženosti pokretnih delova;
- adekvatno balansirati oscilujuće mase;
- povećati krutost i izolacionu moć velikih ravnih površina,
- obezbediti optimalno ukrućenje na kritičnim površinama.

Na slici 1 prikazana su moguća smanjenja nivoa emitovane buke dizel motora.

Slika 1 – Mogućnosti smanjenja buke pojedinih komponenti dizel motora

Primeri mogućih konstrukcionih poboljšanja dizel motora

Proces sagorevanja

Poboljšanje procesa sagorevanja kod dizel motora u znatnoj meri može doprineti smanjenju buke. Stvaranje kompaktnije smeše goriva i ravnomernije raspršivanje u prostoru za sagorevanje može se postići visokim pritiscima ubrizgavanja,

Slika 2 – Zavisnost buke motora od cetanskog broja

povećanim brojem i smanjenim prečnicima otvora na brizgaljkama.

Takvi sistemi omogućavaju ravnomernije raspršivanje goriva, što utiče na smanjenje perioda pritajenog, a naročito neregulisanog sagorevanja. Na takve procese utiče i vrednost cetanskog broja, temperatura vazduha u trenutku ubrizgavanja, stepen kompresije koji diktira veličinu temperature i pritiska, vihorno strujanje i dr.

Poželjno je da cetanski broj goriva bude što veći, kako bi upaljenje smeše što pre nastalo. To doprinosi smanjenju buke motora. Zavisnost nivoa buke od cetanskog broja dizel goriva na udaljenosti 1 m prikazana je na slici 2.

Temperatura vazduha u trenutku ubrizgavanja deluje na brzinu isparavanja i na brzinu pretplamenih reakcija. Povećanjem temperature vazduha postiže se skraćivanje perioda pritajenog sagorevanja.

Stepen kompresije diktira veličinu temperature tokom perioda pritajenog sagorevanja, pa je bitna konstrukcija

kojom se obezbeđuje skraćivanje ovog perioda.

Vihorno kretanje vazduha inicira mešanje i isparavanje, ali i povećanje gubitka zbog intenzivnijeg prenosa topline.

Kod motora sa direktnim ubrizgavanjem goriva u periodu neregulisanog sagorevanja dolazi do nagle promene porasta pritiska, koji izaziva udarno sagorevanje. To karakteriše rad motora sa povećanom bukom i porastom mehaničkih naprezanja delova motora.

Kod dizel motora sa ubrizgavanjem goriva na zid komore gorivo postepeno isparava, tako da ne dolazi do nagomilavanja goriva, pa je porast pritiska relativno blag i udarno opterećenje je slabijeg intenziteta.

Kod motora sa vihornom komorom eventualno burno sagorevanje odvija se u komori, čime je motor zaštićen od naglog porasta pritiska u glavnom prostoru za sagorevanje. Izgled vihorne komore i komore u klipu brzohodnog dizel motora prikazan je na slici 3.

Presek „A-A”

Presek „B-B”

Sl. 3 – Vihorna komora i komora u klipu dizel motora

Kod takvih motora vazduh se sabija i ubacuje tangencijalno u komoru stvarajući intenzivan vrtlog sa ubrizgavanim gorivom u komori, gde se i odigrava početak sagorevanja, da bi potom nesa-gorelo gorivo istrujavalo izvan komore i nastavilo sagorevanje u glavnom pro-storu.

Da bi ceo proces ustrujavanja va-zduha u komoru bio ravnomerniji, a time i bolje formiranje smeše, mogu se prime-niti specijalne konstrukcije vihorne ko-more u glavi motora. Konstrukcija ulaza u komoru omogućava tzv. „trovrtložno“ ustrujavanje vazduha u komoru, što do-prinosi boljem formiranju smeše i ravno-mernijem sagorevanju. Jedno takvo reše-nje sa izgledom oblika ulaska u vihornu komoru i izgled komore u klipu prikazano je na slici 4.

Vihorna komora kod ovakvih mo-tora nije sferična već jajastog oblika, koji omogućava ravnomernije strujanje va-zduha pored zidova komore, odnosno, oblik komore je prilagođen toku strujanja vazduha.

Klipni mehanizam

U toku eksploatacije motora dolazi do habanja radnih površina klipnog me-hanizma, a time i do povećanja zazora koji intenzivira pojavu udara klipa o ko-šuljicu cilindra. Na pojavu udara, pored zazora, utiču i normalna sila koja je promenljivog smera i intenziteta, otklon klipnjače i dr. Intenzitet udara klipa može se smanjiti redukcijom otklona klipnjače (smanjenjem ugla β i povećanjem dužine klipnjače) i pomeranjem ose osovinice od ose klipa za oko 2 do 3% od prečnika cilindra na stranu naleganja klipa, odno-sno u smeru nominalne sile za vreme

Sl. 4 – „Tvrdovrtložno“ ustrujavanje vazduha u vihornu komoru

Sl. 5 – Premeštanje ekscentrično oslonjenog klipa motora

takta ekspanzije. Na slici 5 prikazano je ekscentrično premeštanje oslonjenog kli-pa. Takvo rešenje omogućava pravilniji hod klipa i povoljnije podmazivanje klipa u cilindru, čime se smanjuje i intenzitet pobude.

Kolenasto vratilo

Vibracije sklopa kolenastog vratila mogu predstavljati značajan izvor pobu-de. Gasne sile procesa sagorevanja izaziva-ju vibriranje kolenastog vratila u hori-zontalnom i vertikalnom pravcu. Da bi se vibracije smanjile jedna od mogućnosti je povećanje krutosti većom debljinom

Sl. 6 – Prigušivač udara kolenastog vratila

a)

b)

Sl. 7 – Konstrukciona rešenja korita motora: a) – jednodelno, b) – dvodelno

ramena kolenastog vratila. U novije vreme koriste se prigušivači udara u vidu elastičnih diskova u koje se ugrađuju čaure kliznih ležajeva.

Na slici 6 prikazano je jedno rešenje takvih prigušivača udara. Ispitivanjem je ustanovljeno da je intenzitet zvuka najveći u zoni prigušivača torzionih oscilacija. U toj zoni potrebno je obezbediti što manje zadržavanje vazduha i njegovu rotaciju što se postiže smanjenjem rastojanja između prigušivača i zaptivača za

ulje, i ugradnjom specijalnih akustičkih apsorbera na radilici, koji presecaju tokove vibracija i smanjuju vazdušni prostor u toj zoni.

Korito motora

Kroz zidove korita motora protiče najviše zvučne energije, pa je konstrukciono izvođenje korita i način pričvršćivanja za blok vrlo značajno za ukupnu buku motora. Na slici 7 prikazana su moguća konstrukciona rešenja korita motora.

Takva rešenja ostvaruju se izradom od kompozitnog ili plastičnog materijala, mada njihova primena ima i negativnih efekata, pre svega sa aspekta mogućih udara i relativno lošeg odvođenja toplote. Zvučna izolaciona svojstva takvog rešenja mogu biti poboljšana oblaganjem, sa unutrašnje strane, izolacionim akustičkim materijalom, otpornim na visoke temperature i vibracije (slika 7a).

Pri izradi dvodelnih korita motora, sa tzv. „suknjicom“ od lakih legiranih materijala, npr. $AlSi_{10}Mg$ i dna od čeličnog lima, javljaju se izvesne slabosti zbog nedovoljnog smanjenja emitovanja zvučne energije koja dolazi iz unutrašnjosti motora. Radi boljih apsorpcionih prigušenja mogu se koristiti višeslojni materijali za izradu dna korita, kao što su specijalne ploče od lima debljine oko 1 mm i izolacioni materijal između ploča (slika 7b).

Blok motora

Primenom modalne analize i analize zvučnog intenziteta koje su vršene na dizel motoru ustanovljeni su viši nivoi vibracija i buke u zonama cilindara, odnosno vodenog međuprostora, gde su i zi-

Presek A-A

Sl. 8 – Konstrukcija bloka motora sa produženim bočnim stranicama i dodatnim orebrenjima

Presek „B-B”

Presek „C-C”

Sl. 9 – Konstrukcija glave dizel motora

dovi najmanje debljine. Druga zona po nivou intenziteta je donji deo bloka, odnosno zona ležajeva kolenastog vratila. Da bi se smanjio uticaj pomenutih zona bloka u ukupnoj emisiji buke motora, moguća su konstrukciona rešenja u vidu povećanja debljine zida i uvođenja dodatnih rebara koja bi povećala krutost zone, i produženja bočnih stranica bloka. Kombinacijom takvih konstrukcionih rešenja i primenom materijala sa malim modulom elastičnosti, kojim bi se oblagali zidovi bloka, postigla bi se i akustička poboljšanja. Konstrukciono poboljšanje bloka prikazano je na slici 8.

Glava motora

Glava motora se obično izrađuje od legura lakih materijala, npr. $AlSi_6Cu_4$ i ne predstavlja značajniji izvor buke. Konstrukcija glave dizel motora prikazana je na slici 9.

Ventilski razvod

S obzirom na to da je ventilski razvod motora značajan izvor tzv. mehaničke buke, njeno smanjenje svodi se na optimizaciju poklopca ventilskog razvoda. Mogu se koristiti poklopci izrađeni od silikonske gume, sa obodom od aluminijuma, kao od plastičnih i kompozitnih materijala sa različitim načinima oblaganja.

Na slici 10 prikazani su neki oblici poklopaca glave i način spajanja sa blokom motora.

Razvod motora

Bilo koja varijanta razvoda motora (zupčanički, zupčasti kaiš, lančanički) može biti značajan izvor emisije buke.

Zbog toga su izbor konstrukcionog rešenja, materijal i način pričvršćivanja veoma bitni za akustičko smanjenje buke.

Sl. 10 – Mogući oblici i način oslanjanja poklopca glave motora

Ovaj prostor pogodno je zatvoriti metalnim, plastičnim ili poklopcem od kompozitnog materijala sa elastičnim spojevima, od kojih su neki prikazani na slici 11.

Primena plastičnih materijala u izradi delova motora

Zbog manje mase, lakšeg oblikovanja, veće otpornosti na koroziju, boljih prigušnih svojstava, nižih frekvencija vlastitih oscilacija, i dr. plastični i kompozitni materijali imaju sve veću primenu u proizvodnji motora. Plastični materijali, ojačani vlaknima, poseduju poboljšane mehaničke i toplotne karakteristike u odnosu na konvencionalne plastične materijale. Kod većine plastičnih i kompozitnih materijala, zbog malog modula elastičnosti (krutosti) frekvencije vlastitih oscilacija su niske, pa je radno područje u natkritičnoj zoni frekvencija. Time se postižu visoka prigušenja vibracija i izolacija buke.

Sl. 11 – Poklopci razvoda motora: a) – plastični, b) – metalni

Presek B-B

Koeficijent apsorpcije u difuznom akustičnom polju je:

$$K_a \times 20 \log a - 10 \log [\log e (1 + a^2)]$$

$$a = \omega \cdot m / 2\rho^* \cdot C$$

gde je:

ω – frekvencija zvuka,

ρ^* – gustina vazduha,

C – brzina zvuka u vazдушnom prostoru,

$m = \rho \cdot h$ – masa po jedinici površine,

h – debljina ploče.

Za tanku ravnu ploču, vlastita frekvencija je:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}} \cdot K^2 = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \cdot K^2$$

gde je:

E – modul elastičnosti,

ν – Poasonov koeficijent,

K – talasni broj,

ρ – gustina izolacionog materijala,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} - \text{krutost ploče.}$$

U zavisnosti od zatezne čvrstoće i radne temperature i plastični materijali mogu se primenjivati u izradi komponenta motora.

Koeficijent apsorpcije plastičnih materijala je za 10 do 100 puta veći u odnosu na koeficijent apsorpcije metala.

Danas se od plastičnih i kompozitnih materijala mogu izrađivati poklopci glave motora, korita, poklopci i kućišta razvoda, usisne grane i dr.

U svetu je sve veći trend primene i drugih lakih materijala u proizvodnji motora, tako da se legure aluminijuma koriste za izradu blokova i glava, kompozitni materijali i legure magnezijuma za poklopce, klipnjače od sinterovanih materijala, komponente ventilske razvoda od legura titana, a neki delovi i od keramike, dok se klipovi ojačavaju keramičkim fibrom. Primena lakih alternativnih materijala doprinosi smanjenju mase, trenja, nivoa vibracija, buke, potrošnje goriva i dr.

Zaključak

Da bi se stvorili osnovni preduslovi za optimizaciju konstrukcije dizel motora potrebno je prethodno istražiti proces stvaranja i emisije zvučnih talasa motora u kvalitativnom i kvantitativnom smislu. U Industriji motora Rakovica obavljana su opsežna istraživanja procesa generisanja strukturne buke dizel motora, primenom teorijsko-eksperimentalnih metoda. Teorijskim razmatranjem razrađen je mehanizam stvaranja buke pojedinih sklopova motora, a primenom metoda zvučnog intenziteta, eksperimentalne modalne analize, merenja pritiska i akustičke emisije pojedinih sklopova u anehoičnoj komori locirane su zone sa najvećom akustičkom aktivnošću, određen modalni odziv pojedinih delova motora, kao i struktura buke i doprinos pojedinih sklopova ukupnoj emisiji buke.

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja prikazana su moguća i već sprovedena konstrukciona poboljšanja dizel motora sa aspekta smanjenja ukupne emisije buke. Ta poboljšanja su se ogledala u smanjenju pobuda, promeni odziva struk-

ture i primeni akustičke zaštite. Dati su konkretni predlozi za smanjenje pobude izazvane mehaničkim udarima i procesom sagorevanja, konstrukciona poboljšanja korita, bloka, poklopca razvoda, poklopca glave motora, sa aspekta povećanja krutosti, akustičkog prigušenja i primene novih materijala.

Literatura:

- [1] Petrović, P.: Istraživanje procesa generisanja strukturne buke dizel motora, doktorska disertacija, MF Beograd, 1996.
- [2] Živković, M., Trifunović, R.: Motori sa unutrašnjim sagorevanjem, II deo, MF Beograd, 1983.
- [3] Morrisson, D.: Designing in engine refinement and low noise, Ricardo, 1987.
- [4] Petrović, P., Janković, S., Ognjanović, M.: Modalni odziv i emisija buke pojedinih komponenata dizel motora, XVI Međunarodni naučni stručni skup NMV '97, Beograd, 1997.
- [5] Petrović, P.: Prostiranje pobudnih poremećaja kroz strukturu dizel motora, Vojnotehnički glasnik 2/97.
- [6] Petrović, P., Ognjanović, M., Janković, S.: Research of generation of noise of diesel engine components, Svetski kongres Inter-noise '97, Budimpešta, Vol. 1., avgust 1997.
- [7] Petrović, P., Ognjanović M.: Effect of nature of elastic disturbances on modal responses of diesel engine parts, Int. simpozijum Mašine i mehanizmi – ISMM, Beograd 1997.
- [8] Grupa autora i Petrović, P.: Buka motora i motornih vozila, prilog u monografiji „Buka – osnovi, analiza, izvori i zaštita“, Beograd, G.F., A.F i IMS, 1998.
- [9] Tomić, M., Petrović, S.: Motori sa unutrašnjim sagorevanjem, MF Beograd, 1994.