



MERENJE HODA PLOČE VENTILA EKSPERIMENTALNOG KLIPNOG KOMPRESORA THE VALVE PLATE LIFT MEASUREMENT IN THE EXPERIMENTAL RECIPROCATING COMPRESSOR

Milojević S. *, Pešić R. **, Taranović D. ***, Davinić A. ****

REZIME

Performanse (isporuka i usisna snaga), i pouzdanost klipnih kompresora zavise u velikoj meri od funkcionalnosti ventila. Sa ciljem što preciznijeg projektovanja, neophodno je identifikovati dinamiku zaptivnog elementa ventila. To zahteva povezivanje hoda ploče ventila sa trenutnim položajem kolenastog vratila i drugim parametrima kompresora.

U radu su istraživane neke od eksperimentalnih metoda koje su primenljive za merenje hoda ploče ventila kompresora čije se istraživanje upravo realizuje na probnom stolu za male kompresore za vazduh u Laboratoriji za motore Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu. Eksperimentalni rezultati mogu biti korisni za dalja poboljšanja sa više aspekta, kao na primer za kalibrisanje modela otpora kretanju ploče ventila i dr. Dalji doprinos može biti ostvaren kombinovanjem rezultata merenja i numeričkog modeliranja, koji bi trebalo da doprinesu smanjenju vremena projektovanja i ukupne cene kompresora.

Ključne reči: klipni kompresor, hod ploče ventila, modeliranje

SUMMARY

Performances (delivery rate and power intake), as reliability of reciprocating compressors, largely are in depending upon the valves functionality. With the aim of precise designing, it is necessary to describe the dynamics of the valve sealing element. This requires linking of the valve plate motion with the current position of the crankshaft and other parameters of the compressor.

Surveyed in the paper are some experimental methods applicable for the measurement of the valve plate lift, consisting of the compressor is currently being experimentally investigated on a custom test rig for small air compressors in the Engine Laboratory of the Faculty of Engineering of Kragujevac University. The experimental results can be useful for the further improvement in some areas, as example for refining the models of the resistance to valve plate motion, etc. Further contribution can be achieved by combining the measurements with the

* mr Saša Milojević, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, tiv@kg.ac.rs

** prof. dr Radivoje Pešić, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, pesicr@kg.ac.rs

*** doc. dr Dragan Taranović, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, tara@kg.ac.rs

**** dr Aleksabdar Davinić, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, davinic@kg.ac.rs

numerical methods, which would contribute in reducing the design time and overall cost of the compressor.

Keywords: Reciprocating compressor, valve plate lift, modelling

UVOD

Radni proces klipnog kompresora se reguliše putem periodične promene zapremine radnog prostora u cilindru što se ostvaruje naizmeničnim kretanjem klipa, dok se procesi usisavanja i isporuke komprimovanog vazduha regulišu pomoću ventila. Kompresorski ventili se pri tome automatski otvaraju i zatvaraju u zavisnosti od razlike pritiska ispred i iza ploče ventila, čime se reguliše i trajanje ciklusa u cilindru kompresora. Saglasno prethodnoj činjenici, performanse klipnih kompresora zavise u velikoj meri od funkcionalnosti usisnog i izduvnog ventila, čija efikasnost direktno utiče na isporuku komprimovanog vazduha kompresora.

U okviru pneumatskog kočnog sistema autobusa, teretnih vozila i traktora, klipni kompresor dobija pogon od motora sa unutrašnjim sagorevanjem i radi pri različitim brojevima obrtaja (od 1000 do 3000 min⁻¹), dok se pritisak u sistemu reguliše pomoću sigurnosnih i rasteretnih ventila. U toku rada kompresora, ambijentalni vazduh se komprimuje do vrednosti pritiska od oko 0,6 do 0,8 MPa i skladišti se u rezervoarima na vozilu. U literaturi [5], se došlo do podatka da temperatura vazduha na izdovu kompresora može da dostigne i do 400 °C, ali se u eksploataciji, primenom odgovarajućeg rashladnog sistema na vozilu, ova temperatura obično održava na oko 250 °C. Kod kompresora čiji su delovi izrađeni od legure aluminijuma, maksimalna temperatura je limitirana na 200 °C. U takvim radnim uslovima kada postoje frekventna odstupanja od normalnog radnog režima, veća je verovatnoća za pojavu prevremenih oštećenja delova kompresora. Najčešće se javljaju otkazi ventila usled mehaničkih i termičkih opterećenja, što ima za posledicu otkaz kompresora, slika 1 [2].

Zbog navedenih činjenica, veći industrijski kompresori se obavezno opremaju zaštitnim sistemom. To podrazumeva konstantno praćenje parametara kompresora, i on-line merenje pojedinih veličina, njihovu akviziciju i poređenje sa graničnim vrednostima. Tako je na primer, moguće na osnovu snimljenih podataka analizirati tendenciju promene vrednosti vibracija i temperature usisnog ventila u određenom vremenskom intervalu. Pojačan intenzitet vibracija, čiji intenzitet raste sa brojem radnih sati, može biti signal za preciznije određivanje vremena preventivnog remonta ventila ili kompresora, čime se sprečavaju veće i skupe havarije [7].

Optimiranjem rada kompresora za vazduh putem pravilnije konstrukcije njegovih ventila može se doprineti smanjenju buke motornog vozila čije su vrednosti limitirane odgovarajućim standardima [1,4]. Emisija buke nastaje usled lepršanje ploče ventila i naizmeničnog udara o graničnik i sedište ventila u toku rada kompresora. U toku procesa usisavanja i isporuke komprimovanog vazduha, takođe se emituje zvučna energija izazvana protokom gasa kroz ventil. Putem monitoringa rada kompresora i ventila, praćenjem intenziteta zvučnih talasa može da se detektuje stanje ventila i pojava isticanja. Snimljeni rezultati se obično povezuju sa stanjem pritiska u cilindru i položajem njegove promene, zbog čega se prikazuju na snimljenim *p-V* dijagramu kompresora [7].

Projektovanje ventila se vrši za idealne uslove rada i svojstva radne materije (na primer, za određenu vrednost molekulske težine gasa). Pri tome se usvajaju određene vrednosti za štetnu zapreminu kompresora, masu ploče ventila i koeficijente elastičnosti opruge i prigušenja ploče ventila. Optimalne vrednosti pritiska i temperature, tako projektovanog kompresora su povezane sa odgovarajućim radnim uslovima i brojem obrtaja kolenastog vratila. U cilju preciznijeg projektovanja sklopa ventila i definisanja fizičkog modela pri modeliranju

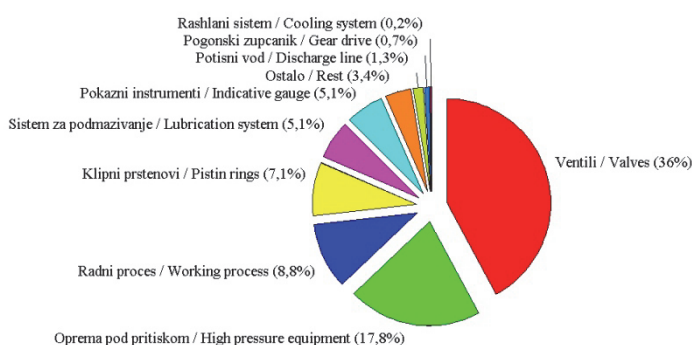
dinamike ventila, neophodno je odrediti zavisnost kretanja ploče ventila od položaja kolenastog vratila i drugih parametara kompresora [2,3,6,8]. To je zadatak eksperimentalnih metoda, koje su delom sistematizovane i predložene u okviru rada.

ANALIZA UZROKA OTKAZA KOMPRESORSKIH VENTILA

Primena klipnih kompresora je intenzivirana na kraju XIX veka. Još tada su ventili identifikovani kao glavni uzroci pojave neplaniranih zastoja klipnih kompresora (36% od identifikovanih otkaza kompresora), dok je ljudski faktor odgovoran za oko 15% otkaza mašine, slika 1 [2].

Pojava isticanja komprimovanog vazduha usled loše zaptivenosti ventila je nepoželjna jer dovodi do pada pritiska u cilindru i smanjenja isporuke kompresora. Istraživanja su pokazala da su gubici usisnog ventila kompresora približno dva puta veći od gubitaka izduvnog ventila [2,3].

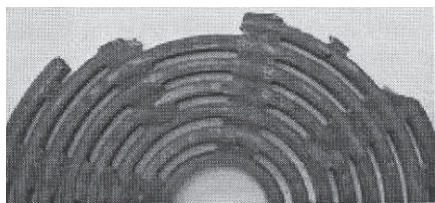
Otkazi ventila zbog pojave mehaničkih oštećenja nastaju kao posledica zamora materijala i ne paralelnog udara ploče ventila o graničnik i sedište. Tada usled pojave udarnih sila dolazi do prevremenog oštećenja ventila i najčešće posledice su lom opruge i ploče ventila. Brzina udara ploče ventila o sedište i graničnik je proporcionalna njenom hodu i raste sa njegovim povećanjem [2]. Navedene činjenice nameću zaključak da većina mehaničkih uzroka otkaza ventila može da se eliminiše pravilnijom konstrukcijom delova ventila (graničnika, sedišta, ploče i opruga)...



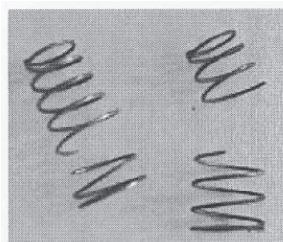
Sl. 1 Uzroci neplaniranih otkaza klipnih kompresora
Fig. 1 Reasons for non-scheduled failures of the reciprocating compressors

Na slici 2 su prikazane fotografije mehaničkih oštećenja delova prstenastog ventila [2]:

- ◆ Slika 2.a., polomljena ploča ventila zbog pojave njenih lokalnih pre-opterećenja pri ne paralelnom udaru o sedište i graničnik. Takvo kretanje ploče je posledica pojave adhezione sile usled čijeg dejstva se njeni delovi lepe za sedište i graničnik ventila. Na konkretnom primeru [3], ispitivanjem je utvrđeno da je intenzitet adhezione sile veći u toku procesa otvaranja ventila, na sedištu, što ima za posledicu ne paralelni udar o graničnik, i
- ◆ Slika 2.b., oštećenje opruge ventila izazvano abrazivnim habanjem.



(a) Ploča ventila; (a) Valve plate



(b) Opruga ventila; (b) Valve spring

Sl. 2 Fotografije oštećenih delova ventila
Fig. 2 Pictures of the damaged valve elements

RASPOLOŽIVE METODE ZA MERENJE HODA PLOČE VENTILA EKSPERIMENTALNOG KOMPRESORA

Prva merenja hoda ploče ventila su izvedena kontaktnim metodama i zabeležena su još 1930. godine. Tek kasnije su razvijane i intenzivnije primenjivane beskontaktno metode. Tako se prvo počelo od igle za zapisivanje signala na papiru do primene induktivnih ili kapacitivnih davača, preko savremenih optičkih uređaja. Posmatrano sa aspekta problematike merenja hoda ploče ventila u dinamičkim uslovima, pri radu kompresora, dostupna merna tehnika nije nimalo jednostavna za konkretnu primenu i često je komercijalno nedostupna. Tako su istraživanjem identifikovani i sistematizovani neki opšti problemi koji se odnose na problematiku merenja hoda ploče ventila malih klipnih kompresora u eksperimentalnim uslovima [2]:

- ◆ Ploča ventila, kao i sam ventil su malih masa i dimenzija. Prostor za ugradnju davača hoda ploče ventila je nedovoljan i nepristupačan za ugradnju delova merne tehnike. Zbog toga, kontaktni davači ne mogu da se primene bez određenih izmena konstrukcije ventila, što zahteva modifikaciju glave kompresora, čime se menja radna zapremina cilindra, što sumarno dovodi do odstupanja od projektovanih karakteristika kompresora,
- ◆ Radni prostor/ medijum sadrži dosta nečistoća, usled prisustva čestica prašine i kapljice ulja,
- ◆ Vremenski posmatrano, otvaranje i zatvaranje ventila traje oko 10 ms, što je dosta kratko ako se uzme u obzir osetljivost raspoloživih davača u deklarisanom mernom opsegu i dinamičkim radnim uslovima,
- ◆ Zahteva se precizno merenje hoda ploče ventila čije je pomeranje reda veličine od svega nekoliko milimetara. Pri tome je potrebno da se uzmu u obzir i da se izoluju periodična i veoma mala odskakivanja ploče reda veličine 50 μm . Zbog ne paralelnog pomeranja ploče ventila, neophodno je hod meriti u tri tačke, što zahteva složeniju mernu opremu,
- ◆ Raspoloživi davači su osetljivi na intenzivne promene radne temperature, i
- ◆ Davači su uglavnom projektovani za potrebe merenja hoda delova od metala i imaju ne standardne merne opsege i visoke cene.

Savremenije poznate metode za merenje hoda ploče ventila su zasnovane na primeni optičkih uređaja kao što je na primer Lasser Doppler Vibrometer i sl. [2]. Na slici 3 je prikazan poprečni presek ventila sa ugrađenim delovima instalacije za merenje hoda ploče ventila [2]. Merenje je realizovano primenom tri nezavisno postavljena optička vlakna koji su pojedinačni izvori usmerenog snopa laserskih zraka (hod je meren u tri tačke). Optičko vlakno senzora je fabrički utopljeno u konektoru, preko koga se povezuje i integriše sa graničnikom ventila. Analizirana

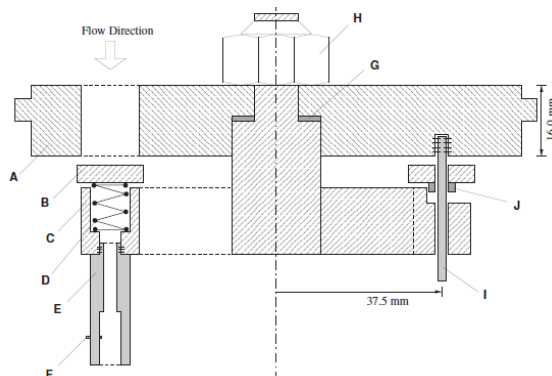
eksperimentalna instalacija je opremljena optičkim senzorima marke i tipa Thorlabs CPS194, sa prijemnikom i pojačavačem signala marke i tipa Thorlabs PDA55 i sistemom za akviziciju podataka DIFA [2].

Izvor laserskih zraka se nalazi u konektoru, iz koga se zraci usmeravaju prema ploči ventila (B), od koje se svetlosni snop reflektuje, prenoseći tim putem merni signal kroz cevčicu koja je takođe integrisana u graničniku ventila. Na osnovu intenziteta reflektovanog svetlosnog snopa može se odrediti rastojanje između ploče i kraja optičkog vlakna, a time i hod ploče ventila, slika 4 [2]. Snop svetlosti se pri merenju usmerava prema pravilu usmerava od izvora prema strani ploče koja nije direktno izložena protoku radnog fluida (engl. downstream side).

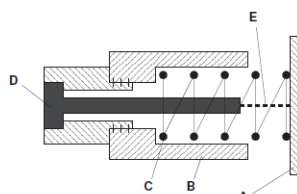
Pri merenju, koeficijent refleksije ima velikog uticaja na tačnost rezultata. Aluminijum ima visok koeficijent refleksije, pa je poželjno da ploča ventila bude obložena slojem aluminijuma. Kalibracija davača se realizuje umetanjem kratke baždarnice cevčice standardnih dimenzija između sedišta i ploče ventila. Kalibracija treba da se izvrši nezavisno za svako optičko vlakno. Na taj način se dobija dijagram sa kalibracionim krivama (zavisnost pomeranja od napona odgovarajućeg senzora) [2].

Druga predložena metoda za merenje hoda ploče ventila je zasnovana na merenju protoka. Poznato je da se kod većine raspoloživih modela za proračun performansi kompresora energetske gubici ventila modeliraju putem određivanja koeficijenta isticanja, čija veličina predstavlja odnos između izmerenog stvarnog masenog protoka i njegove referentne/ idealne vrednosti.

Referentno merenje se izvodi u laboratorijskim uslovima, na standardizovanoj komponenti oblika idealnog otvora iste površine protočnog preseka kao modelirani ventil. Dobijeni rezultati važe za protok u stacionarnim uslovima. U realnosti, stvarni protok kroz ventil je manji zbog dejstva otpora i pojave entropije [2,6]. Merenje se u laboratorijskim uslovima izvodi na taj način što se ploča ventila fiksira pri određenom hodu h , a zatim se variraju uslovi protoka tj.



Sl. 3 Poprečni presek modela ventila
 Fig. 3 Cross sectional view of the valve model
 A-sedište seat, B-ploča ventila/ valve plate, C-graničnik/ limiter, D-opruga/ spring, E-konektor optičkih vlakana/ optical connector, F-imbus navrtka za podešavanje položaja/ nut for the position regulation, I-vođica/, J-cevčica/ tube



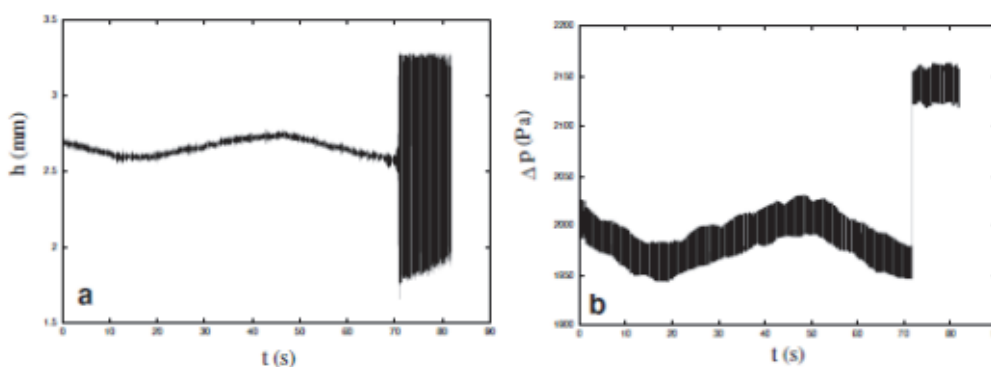
Sl. 4. Skica sklopa ventila sa integrisanim senzorom za merenje hoda ploče
 Fig. 4. Sketch of valve assembly with integrated sensor for the valve plate lift measuring
 A: plate/ ploča, B: limiter/ graničnik, C: spring/ opruga, D: glasfiber bundle/ stakleno vlakno, E: emitted and reflected laser light/ emitovani i reflektovani laserski zrak

odnos pritisaka. Izmerene vrednosti referentnih merenja se snimaju. Podaci dobijeni na ovaj način važe u slučaju potpuno otvorenog ventila i nisu pouzdani za procenu vrednosti određenih parametara ventila na režimima parcijalne otvorenosti.

U literaturi [2] se navodi primer merenja zapreminskog protoka u stacionarnim uslovima pomoću merne turbine (Istromet Q75K), putem određivanja ugaone brzine kola turbine. Stvarni protok je računat pomoću korekcionih faktora koji uzimaju u obzir promenu zapreminskog protoka usled promene gustine gasa u zavisnosti od temperature i sl.

Razlika pritisaka usled protoka vazduha kroz model ventila u statičkim uslovima je u literaturi [2] merena pomoću piezo otpornog davača (Druck, DPI 145). Ventil je pri merenju ugrađen na kraju cevi, sa ciljem da vrednost izlaznog pritiska bude ekvivalentna pritisku u laboratoriji.

Na slici 5 su prikazani rezultati merenja hoda ploče ventila u stacionarnim uslovima metodom određivanja razlike pritisaka [2]. Analizom dobijenih rezultata izmerenog hoda ploče ventila može se uočiti, da se pre pojave rezonance ($t < 70 \cdot 10^{-3}$ s), u kompresoru odvija proces kompresije, posle čega se ventil otvara, što se reflektuje na povećanje razlike pritisaka Δp .



(a) Otvaranje ventila; (a) Valve opening (b) Razlika pritisaka; (b) Pressure difference
Sl.5 Tok povećanja vremenski osrednjene vrednosti Δp pri pojavi ne stacionarnog protoka
Fig. 5 Increase of time-averaged Δp at onset of unsteady flow

Metode merenja hoda ploče ventila u dinamičkim uslovima nisu detaljnije analizirane u okviru rada. Veličina zapreminskog protoka i razlika pritisaka kroz ventil, mogu se u dinamičkim uslovima odrediti primenom zakonitosti linearne teorije prostiranja zvuka. Finalne vrednosti se dobijaju superpozicijom statičkih i dinamičkih komponenti odgovarajućih veličina. Kao primer se može navesti metod dva mikrofona [2] koji se zasniva na principu frekventne analize talasa na ulazu u ventil.

Parametri ventila, koje je potrebno poznavati pri modeliranju i merenju hoda ploče ventila su: efektivna masa ploče ventila, koeficijent prigušenja, hod ploče ventila, krutost opruge, prednapon opruge i maksimalni hod ploče ventila. Efektivna masa ploče ventila predstavlja izmerenu težinu ploče sa mernom opremom i dodatom efektivnom masom opruge [8]. Koeficijent prigušenja se određuje postavljanjem jednačina ravnoteže za oscilacije bez prigušenja i stacionarne uslove. Hod ploče ventila opada eksponencijalno sa vremenom [2]. Krutost opruge se određuje merenjem sile i hoda ploče u statičkim uslovima, kada sila gravitacije teži da otvori ventil. Merenjem geometrijskih parametara može da se odredi

prednapon opruge i maksimalni hod ploče ventila.

ZAKLJUČCI

Performanse klipnih kompresora zavise od funkcionalnosti ventila, čija efikasnost direktno utiče na isporuku komprimovanog vazduha kompresora. Optimalne vrednosti pritiska i temperature kompresora su povezane sa odgovarajućim radnim uslovima i brojem obrtaja kolenastog vratila.

Pojava isticanja komprimovanog vazduha usled loše zaptivenosti ventila je nepoželjna i dovodi do pada pritiska u cilindru i smanjenja isporuke kompresora. Mehanički otkazi ventila mogu da se eliminišu pravilnijom konstrukcijom njegovih delova. Dalji doprinos može biti ostvaren kombinovanjem rezultata merenja i numeričkog modeliranja, što bi trebalo da doprinese smanjenju vremena projektovanja i cene kompresora.

Savremenije metode za eksperimentalno merenje hoda ploče ventila su zasnovane na primeni optičkih uređaja kao što je na primer Lasser Doppler Vibrometer i sl. Zapreminski protok i razlika pritiska kroz ventil, mogu se u dinamičkim uslovima odrediti primenom linearne teorije prostiranja zvuka.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat istraživanja na projektu Tr 35041 koji je finansiran od strane Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1.] Erol H. and Gurdogan A. (2000). The Noise and Vibration Characteristics of a Reciprocating Compressors: Effects of Size and Profile of Discharge Port. Purdue International Compressor Engineering Conference. Paper 1450.
- [2.] Habing, R.A. (2006). Flow and Plate Motion in Compressor Valves. PhD Thesis, Univ. Twente.
- [3.] Milojević S., Pešić R., Taranović D. (2012). Izvođenje ventila klipnih kompresora i uslovi pri modeliranju, Journal Tractors and Power Machines, Novi Sad, ISSN 0354-9496(2012) 17: 2/3, p. 71-77, UDK 621.629.
- [4.] Milojević S., Lukić J., Pešić R. (2013). Contribution to the reduction of traffic noise by application of the CNG buses. DEMI 2013, 11th International Conference on accomplishments in electrical and mechanical engineering and information technology, Banja Luka, 30th May – 1st June 2013. Proceedings, 873-878. ISBN 978-99938-39-46-0, COBISS.BH-ID 3729176.
- [5.] Mullner T. and Biemeier O. (2008). Heat Transfer in Small Piston Compressors. Purdue International Compressor Engineering Conference. Paper 1908.
- [6.] Ninković, D., Taranović, D., Milojević, S. and Pešić, R. (2012). Modelling valve dynamics and flow in reciprocating compressors – a survey. International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, Kragujevac, October 3rd-5th, 2012, Proceedings (Pešić R., Lukić J.), MVM2012-022, pp. 113-125, ISBN 978-86-86663-91-7.
- [7.] Schultheis M. S., Lickteig A. C. and Parchewsky R. (2000) Reciprocating compressor condition monitoring. Proceedings of the Twenty-Ninth Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, pp. 107-113.
- [8.] Taranović D. (2013). Modeliranje merne instalacije za nestandardna ispitivanja klipnih kompresora motornih vozila, Doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu 2013.

Rad primljen: 01.09.2013.

Rad prihvaćen: 15.09.2013.

CIP - Kategorizacija u publikaciji
Biblioteka Matice srpske, Novi Sad
631.372

TRAKTORI i pogonske mašine: Časopis Naučnog društva za pogonske mašine, traktore i održavanje = Tractors and Power Machines: Journal of Science Society of Power Machines, Tractors and Maintenance/glavni urednik Tomić Milan
- God. 1. br. 1 (1996) - Novi Sad: Naučno društvo za pogonske mašine, traktore i održavanje: Poljoprivredni fakultet, Departman za poljoprivrednu tehniku, 1996-, -ilustr.; 24 cm

Pet brojeva godišnje.
ISSN 0354-9496

COBISS.SR-ID 140062983