

# METODA ZA ODREĐIVANJE PROTOKA I MEHANIČKE EFIKASNOSTI KOMPRESORA KOČNOG SISTEMA

## METHOD FOR DETERMINING OF FLOW AND MECHANICAL EFFICIENCY OF COMPRESSOR IN BRAKING SYSTEM

*Milojević S.<sup>\*</sup>, Pešić R.<sup>\*\*</sup>, Taranović D.<sup>\*\*\*</sup>, Stojanović B.<sup>\*\*\*\*</sup>*

### REZIME

*Povećanje broja transportnih sredstava, sve više ima negativan uticaj na okolinu. Zbog toga, razvoj i primena novih pogonskih sistema u transportu putnika i robe, predstavlja jedan od prioriteta transportne politike u mnogim evropskim zemljama.*

*Na osnovu dosadašnjih istraživanja u oblasti motora sa unutrašnjim sagorevanjem, potvrđeno je da mehanički gubici u okviru klipne grupe imaju veliki deo u ukupnim gubicima na trenje. Kod klipnih kompresora za vazduh, slično kao u motorima, snaga se uglavnom angažuje za savladavanje trenja.*

*Za potrebe istraživanja, izvršena je optimizacija triboloških karakteristika kliznih površina klipa i cilindra od legure aluminijuma. U laboratoriji za motore i kompresore na Univerzitetu u Kragujevcu i Fakultetu inženjerskih nauka, izvršeno je i ispitivanje tribološki optimizovanog eksperimentalnog klipnog kompresora za vazduh.*

**Ključne reči:** Aluminijum, klipni kompresori, mehanički gubici, trenje.

### SUMMARY

*Increasing of transport volumes brings more and more negative environmental impacts. Therefore, the development and application of new propulsion systems in the transport of passengers and goods is one of the priorities of transport policy in many European countries.*

*Based on the large number of research on internal combustion engines have confirmed that the mechanical losses of piston group parts make up most of the losses related to friction in the engines. Power losses in the reciprocating piston air compressors are mainly engaged to overcome friction.*

\* mr Saša Milojević, stručni savetnik. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka,  
[sasa.milojevic@kg.ac.rs](mailto:sasa.milojevic@kg.ac.rs)

\*\* dr Radivoje Pešić, prof. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, [pesicr@kg.ac.rs](mailto:pesicr@kg.ac.rs)

\*\*\* dr Dragan Taranović, vanr. prof. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka,  
[tara@kg.ac.rs](mailto:tara@kg.ac.rs)

\*\*\*\* dr Blaža Stojanović, vanr. prof. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka,  
[blaza@kg.ac.rs](mailto:blaza@kg.ac.rs).

For research purposes, we performed optimizing tribological properties of the sliding surfaces between the piston and cylinder which are made of aluminium alloys. In addition, we have carried out and testing of experimental reciprocating compressor on the test rig, in the laboratory for engines and compressors in University of Kragujevac and Faculty of Engineering.

**Keywords:** Aluminum, reciprocating compressors, mechanical losses, friction.

## UVOD

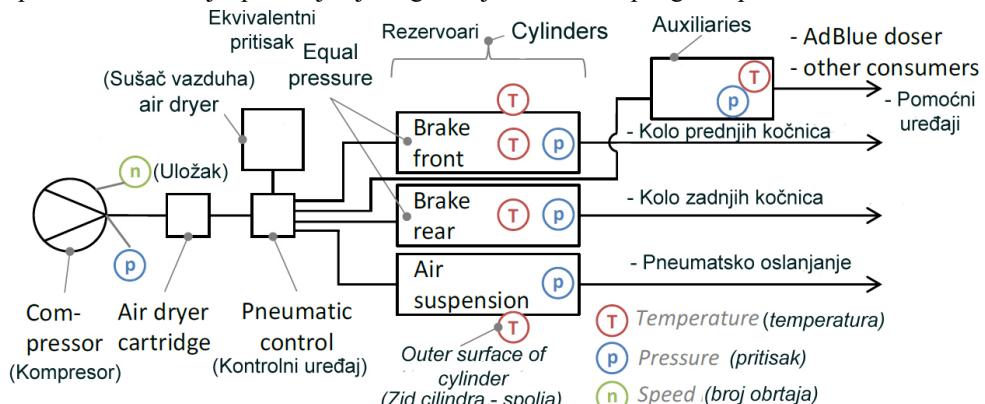
Od konferencije UN-a o klimatskim promenama u Parizu 2015. godine, postoji ozbiljan politički konsenzus za intenzivniju primenu mera protiv globalnog zagrevanja. Evropska komisija je sa tim u vezi propisala niz mera za smanjenje emisije gasova staklene baštne, odnosno emisije ugljen-dioksida iz svih izvora. U sektoru transporta, granice za dozvoljenu emisiju ugljen-dioksida su obavezne za nova putnička i laka teretna vozila [1-3].

Sa druge strane, za teška teretna vozila ne postoji sličan propis u EU. Zbog toga i nije bilo mnogo napretka u oblasti njihovog smanjenja potrošnje goriva, a time i emisije ugljen-dioksida, ako se porede modeli vozila počevši od norme EURO I (1992-1996) do Euro VI (od 2013.). Zbog činjenice da sva vozila moraju doprinositi smanjenju potrošnje goriva i emisije, donet je propis u EU za smanjenje emisije i sertifikaciju svih novih teških teretnih vozila. Polazna ideja je bila da se prvo utvrди koje komponente vozila, i u kojoj meri doprinose smanjenju mehaničkog stepena korisnosti i povećanju potrošnje goriva, a zatim da se izvrši optimizacija istih [4, 5].

Kao doprinos, istraživali smo rešenja za smanjenje angažovanja snage motora od strane klipnog kompresora za vazduh u kočnjem sistema vozila, putem smanjenja mehaničkih gubitaka tribološkog sistema klip, klipni prstenovi, zid cilindra [6-8].

Kompresori za vazduh u kočnjim sistemima kamiona i autobusa su dvotaktne klipne mašine koje se koriste za isporuku vazduha do sudova pod pritiskom i potrošača, odnosno uređaja na vozilu. To su uglavnom pneumatski kočni sistem, spojnica, menjajući sa izvodima snage, sistem elastičnog oslanjanja, oprema na motoru, brizgači AdBlue tečnosti za prečišćavanje izduvnih gasova itd.

Za potrebe istraživanja, postavljen je odgovarajući model klipnog kompresora, slika 1.



Sl. 1 Sistem za komprimovani vazduh na kamionu (kategorija N2)

Fig. 1 Compressed air system of a delivery truck (category N2)

Maseni protok vazduha pneumatskog sistema može da se odredi primenom jednačine stanja idealnog gasa, jednačine 1 i 2. Ulagne veličine su temperatura i pritisak vazduha, kao i zapremina cilindra [8].

$$(p \cdot V)_R = R_{s,air} \cdot (m \cdot T_{avr})_{R,air} \quad (1)$$

i,

$$V_{air,tot,std} = \frac{m_{air,tot}}{\rho_{air,tot}} \quad (2)$$

gde je:

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| $(p \cdot V)_R$             | - Pritisak i zapremina gase u cilindru;  |
| $(m \cdot T_{avr})_{R,air}$ | - Masa vazduha i srednja vrednost temperature u cilindru;  |
| $m_{air,tot}$               | - Ukupna masa vazduha u pneumatskom sistemu;   |
| $R_{s,air}$                 | - Univerzalna gasna konstanta za suvi vazduh, $287.1 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  |
| $\rho_{air,std}$            | - Gustina suvog vazduha pri standardnim uslovima okoline:<br>$(20^\circ\text{C}, 1.013 \text{ bar})$ ; $1.204 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$                            |
| $V_{air,tot,std}$           | - Količina vazduha, izražena u kilogramima po standardnom litru vazduha:<br>litar suvog vazduha pri $(1 \text{ bar}, 20^\circ\text{C})$ ; $[sl] = 0.001204 \text{ kg}$ . |

Masa vazduha u rezervoarima se računa u intervalima od jedne sekunde, uz pretpostavku da su zapremine svih pojedinačnih rezervoara za komprimovani vazduh jednake, slika 1.

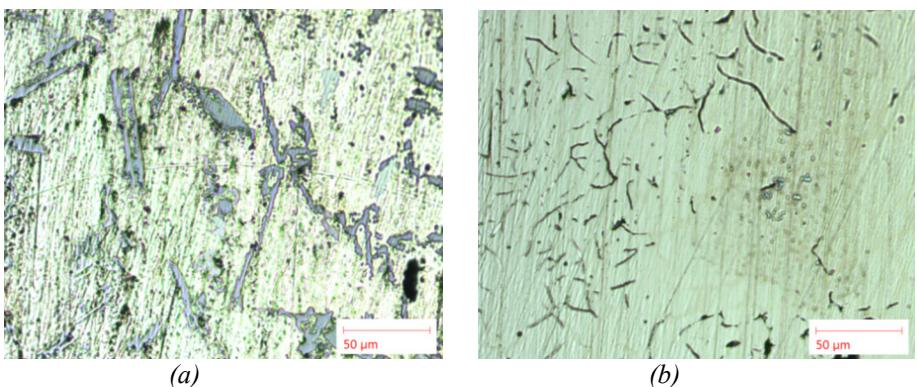
## REZULTATI TRIBOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA

U toku istraživanja je analiziran efekat triboloških ojačavača na bazi gvožđa, na tribološke karakteristike patentiranog aluminijumskog cilindra eksperimentalnog klipnog kompresora [9-10]. Ispitivanje je izvršeno sa osnovnim materijalom cilindra (legura aluminijuma) i sa uzorcima ojačavača na bazi gvožđa i izvršena je odgovarajuća procena triboloških karakteristika.

Na slici 2.a je prikazana mikrostruktura baznog materijala (optički prikaz). Sivi tragovi su posledica prisustva eutektičkog silicijuma. Na slici 2.b je prikazan materijal triboloških uključaka na bazi gvožđa, tj. ojačavača (optički prikaz). Utvrđeno je da crne linije na površini mikrostrukture ojačavača predstavljaju tragove grafita u livenom gvožđu, a ne naprsline [9, 11, 12].

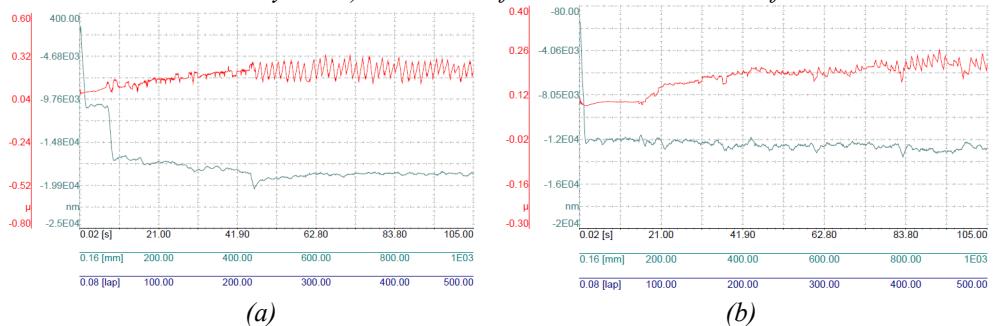
Dijagrami promene koeficijenta trenja i traga habanja (ordinata) tokom klizanja u zavisnosti od vremena, rastojanja i broja ciklusa (apscisae) su prikazani na slici 3.a za osnovni materijal (aluminijum) i na slici 3.b za tribološke ojačavače od livenog gvožđa.

Na visokom opterećenju, snimljene su niže srednje vrednosti koeficijenta trenja ojačavača, slika 3. Dobijene vrednosti koeficijenta trenja za ojačavač se kreću u opsegu  $(0,087-0,262)$ , i  $(0,076-0,327)$  za osnovni materijal. Srednja vrednost koeficijenta trenja ojačavača je niža i iznosi  $(0,176)$  u poređenju sa vrednošću za osnovni materijal  $(0,202)$ .



Sl. 2 Optički prikaz materijala eksperimentalnog cilindra: a) sa osnovom od legure aluminijsuma i b) sa ojačavačima na bazi livenog gvožđa

Fig. 2 The optical microscopy of materials for experimental cylinder: a) with a base of aluminum alloy and b) with the reinforcements on the basis of cast iron



Sl. 3 Koeficijent trenja i trag habanja pri uslovima ( $F_N = 0,9 \text{ N}$ ;  $V = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) za (a-osnovni materijal i b-ojačavač); filtriran signal

Fig. 3 Coefficient of friction and penetration depth under ( $F_N = 0,9 \text{ N}$ ;  $V = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) for (a-base material and b-reinforcement); filtered signal

## PROBNI STO ZA MERENJE GUBITAKA USLED TRENJA U KLIPNIM KOMPRESORIMA

Istraživani klipni kompresor, kao pomoći uređaj na vozilu, dobija pogon od motora sa unutrašnjim sagorevanjem ili elektromotora, u slučaju laboratorijskih ispitivanja. Uz pomoć davača pritiska koji se ugrađuje u glavi cilindra, slika 4.a, i sistema za akviziciju podataka, snima se indikatorski pritisak ( $W_i$ ). Efektivna snaga kompresora (na pogonskom vratilu), ( $P_e$ ) je pogonska, suprotno motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. Indikatorska snaga kompresora ( $P_i$ ), prema tome, predstavlja efektivnu snagu koja je umanjena za snagu mehaničkih gubitaka ( $P_m$ ). Navedena razlika predstavlja snagu koja je neophodna za savladavanje mehaničkih gubitaka u kompresoru (trenje u ležajevima, trenje usled klizanja u okviru sklopa klip, klipni prstenovi, zid cilindra itd), jednačina 3.

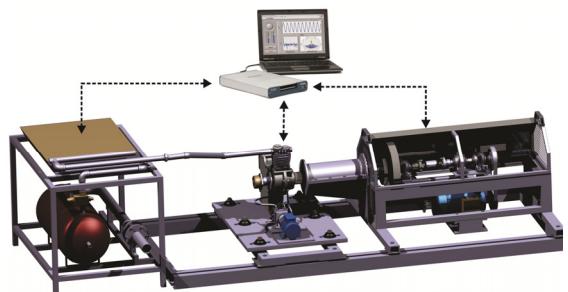
$$P_i = P_e - P_m \quad (3)$$

Mehanički stepen korisnosti klipnog kompresora se određuje primenom jednačine 4.

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_e} = \frac{P_e - P_m}{P_e} = 1 - \frac{P_m}{P_e} \quad (4)$$



(a)



(b)

Sl. 4 Fotografija eksperimentalne instalacije (a-klipni kompresor i b-probni sto za klipne kompresore)

Fig. 4 Photography of the experimental installation (a-reciprocating compressor and test rig)

Primena metode indiciranja pritiska u cilindru, za određivanje mehaničkih gubitaka, između ostalog zahteva i uspostavljanje i održavanje određenih radnih režima ispitivanja i uslova okoline. Za tu svrhu je postavljen odgovarajući rashladni sistem. Kompresor se prilikom ispitivanja hlađi prinudno, uljem iz sistema za podmazivanje i pomoću ventilatora. Probni sto za ispitivanje kompresora je prikazan na slici 4.b [13, 14]. Kompresor snabdeva komprimovanim vazduhom rezervoar pod pritiskom. Pritisak u rezervoaru se reguliše automatski posredstvom namenski projektovanog servo-ventila, što omogućava simuliranje radnih uslova na vozilu, gde su priključeni odgovarajući uređaji.

Generalno, upotrebljene karakteristike kompresora se menjaju tokom vremena u radu. Pored zamora materija, uzroci otkaza kompresora su loše održavanje, i kao posledica navedenog, intenzivno habanje i lom delova.

Za potrebe kompleksnijeg eksperimentalnog ispitivanja kompresora, korišćen je standardizovan test ACACA Protocol™, koji je propisalo Australijsko udruženje za kompresore na vazduh. Protokolom je definisan postupak određivanja isporuke kompresora (FAD, engl. Free Air Delivery).

FAD ( $l \cdot min^{-1}$ ) predstavlja zapreminske protok vazduha (mereno pri standardnim uslovima okoline) koji se komprimuje i isporučuje na izlasku iz rezervoara komprimovanog vazduha do potrošača.

Protok vazduha se meri primenom metode punjenja rezervoara. Tokom ispitivanja, kompresor se postavi na određeni režim pri ustaljenim uslovima opterećenja i meri se vreme koje je neophodno za povećanje pritiska vazduha u rezervoaru sa 6 na 8 bar. Isporuka vazduha se na osnovu izmerenih veličina računa primenom jednačine 5:

$$FAD = \frac{V_R \cdot (p_1 - p_2)}{p_o \cdot t} = \frac{2 \cdot V_R}{t} \quad (5)$$

gde je:

$p_1, p_2$  - Pritisak vazduha u rezervoaru na početku i na kraju ispitivanja;

$t$  - Vreme punjenja rezervoara, koje je neophodno za povećanje vrednosti

pritska vazduha u rezervoaru sa  $p_1$  na  $p_2$ ,  $min$ ; i  
 $p_0$  - Atmosferski pritisak:  $p_0 = 100 \text{ kPa}$  (1 bar).

Ispitivanje kompresora se ostvaruje vremenski najviše 20 minuta posle postizanja normalne radne temperature mašine. U skladu sa Protokolom, realizuju se 3 merenja i kao vrednost isporuke se uzima srednja vrednost svih merenja.

Predložena metoda punjenja rezervoara je primenljiva za ispitivanje manjih kompresora čija je pumpna zapremina do  $600 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Veći kompresori se moraju ispitivati prema standardu ISO 1217.

Pumpna zapremina ( $\dot{V}_h, \text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ) predstavlja teorijsku zapreminu vazduha, koja se može isporučiti klipnim kompresorom do potrošača, ako je njegov stepen korisnosti 100%, jednačina 6:

$$\dot{V}_h = \frac{\pi d^2}{4} s N \chi n_e 10^{-6} \quad (6)$$

gde je:

$d, s$  - Prečnik i hod klipa u silindru, mm;

$N$  - Broj cilindara;

$\chi$  - 1 za cilindre jednostranog i 2 za cilindre dvostranog dejstva; i

$n_e$  - Broj obrtaja kolenastog vratila kompresora,  $min^{-1}$ .

## ZAKLJUČCI

Evropska komisija je propisala niz mera za smanjenje emisije gasova staklene bašte, odnosno emisije ugljen-dioksida iz svih izvora. Za teška teretna vozila duži vremenski period nije postojao propis za smanjenje potrošnje goriva, ako se porede modeli vozila počevši od norme EURO I (1992-1996) do Euro VI (od 2013.). Zbog činjenice da sva vozila moraju doprinositi smanjenju potrošnje goriva i emisije, donet je propis u EU za smanjenje emisije i sertifikaciju svih novih teških teretnih vozila.

Polazna ideja je bila da se prvo utvrdi koje komponente vozila, i u kojoj meri doprinose smanjenju mehaničkog stepena korisnosti i povećanju potrošnje goriva, a zatim da se izvrši optimizacija istih. Kao doprinos, istraživali smo rešenja za smanjenje angažovanja snage motora od strane klipnog kompresora za vazduh kočnog sistema vozila putem smanjenja mehaničkih gubitaka tribološkog sistema klip, klipni prstenovi, zid cilindra.

U toku istraživanja je analiziran efekat triboloških ojačavača na bazi gvožđa, na tribološke karakteristike patentiranog aluminijumskog cilindra eksperimentalnog klipnog kompresora. Na visokom opterećenju, snimljene su niže srednje vrednosti koeficijenta trenja ojačavača. Srednja vrednost koeficijenta trenja materijala ojačavača je niža i iznosi (0,176) u poređenju sa vrednošću za osnovni materijal (0,202).

Formiran je i probni sto za ispitivanje upotrebnih karakteristika klipnog kompresora metodom indiciranja pritska u cilindru. Za potrebe kompleksnijeg eksperimentalnog ispitivanja kompresora, korišćen je standardizovan test ACACA Protocol™, koji je propisalo Australijsko udruženje za kompresore na vazduh. Protokolom je definisan postupak određivanja isporuke kompresora (FAD), primenom metode punjenja rezervoara.

## ZAHVALNOST

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

## LITERATURA

- [1.] Skrúcaný, T.; Kendra, M.; Stopka, O.; Milojević, S.; Figlus, T.; Csiszár, C. Impact of the Electric Mobility Implementation on the Greenhouse Gases Production in Central European Countries. *Sustainability* 2019, *11*, 4948.
- [2.] Milojević, S. (2016). Reconstruction of Existing City Buses on Diesel Fuel for Drive on Hydrogen. *Applied Engineering Letters*, vol. 1, no. 1, p. 16-23.
- [3.] Skrúcaný, T., Milojević, S., Semanová, Š., Čechovič, T., Figlus, T., Synák, F. (2018). The Energy Efficiency of Electric Energy as a Traction Used in Transport. *Transport technic and technology*, vol. XIV, no. 2, p. 9-14.
- [4.] Milojević, S., Skrúcaný, T., Milošević, H., Stanojević, D., Pantić, M., Stojanović, B. (2018). Alternative Drive Systems and Environmentaly Friendly Public Passengers Transport. *Applied Engineering Letters*, vol. 3, no. 3, p. 105-113.
- [5.] Milojević, S., Pešić, R. (2011). CNG Buses for Clean and Economical City Transport. *Mobility & Vehicle Mechanics (MVM)*, vol. 37, no. 4, p. 57-71.
- [6.] Pesic, R. & Milojevic, S. Int.J Automot. Technol. (2013) 14: 675. <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0073-4>.
- [7.] Milojević, S. (2017). Sustainable application of natural gas as engine fuel in city buses: Benefit and restrictions. *Applied Engineering Science*, vol. 15, no. 1, p. 81-88.
- [8.] Ninković, D., Taranović, D., Milojević, S., Pešić, R. (2013). Modelling Valve Dynamics and Flow in Reciprocating Compressors. *Mobility & Vehicle Mechanics (MVM)*, vol. 39, no. 3, p. 47-63.
- [9.] Pešić, R. (2004). ASMATA—Automobile Steel Material Parts Substitution with Aluminum. *Mobility & Vehicle Mechanics (MVM), Special Edition*, vol. 30.
- [10.] Kennedy, M., Hoppe, S., Esser, J. (2012). Piston Ring Coating Reduces Gasoline Engine Friction. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, vol. 73, no. 5, p. 40-43.
- [11.] Milojević, S., Pešić, R., Taranović, D. (2015). Tribological Principles of Constructing the Reciprocating Machines. *Tribology in Industry*, vol. 37, no. 1, p. 13-19.
- [12.] Saša Milojević, Dragan Džunić, Dragan Taranović, Radivoje Pešić, Slobodan Mitrović. (2019). Optimization of mechanical losses in reciprocating air compressor with cylinder consisting of aluminum alloy. Proceedings on Engineering Sciences, 16th International Conference on Tribology – SERBIATRIB '19, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May.
- [13.] Taranović, D., Ninković, D., Davinić, A., Pešić, R., Glišović, J., Milojević, S. (2017). Valve dynamics in reciprocating compressors for motor vehicles. *Tehnički Vjesnik*, vol. 24, no. 2, p. 314-319.
- [14.] Saša Milojević, Radivoje Pešić, Dragan Taranović, Aleksandar Davinić. (2019). Power measurement of mechanical losses in experimental reciprocating air compressor impact of piston group. 14<sup>th</sup> International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019. University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, 24 - 25 May.

Rad primljen: 11.10.2019.

Rad prihvaćen: 27.10.2019.

# TRAKTORI I POGONSKE MAŠINE

TRACTORS AND POWER MACHINES

3/4

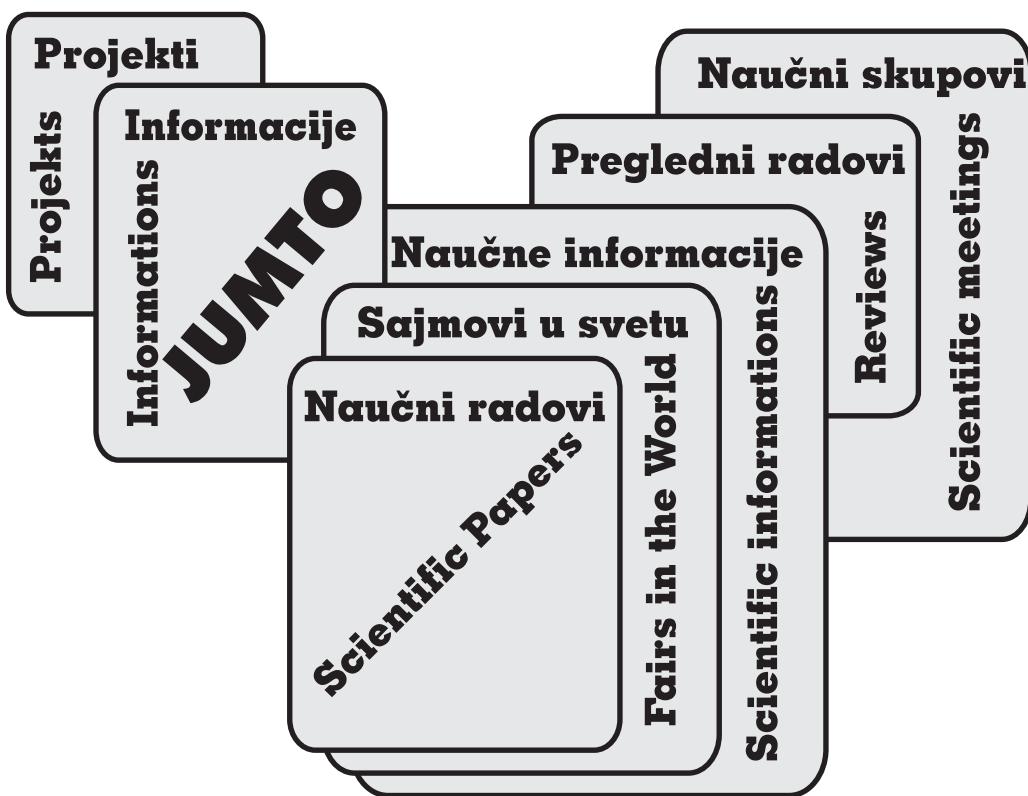
UDK 631.372

ISSN 0354-9496

Godina 24

Dec. 2019.

## SADRŽAJ - CONTENTS



Novi Sad, Srbija

Trakt. i pog. maš., Trac. and pow. mach., Vol.24, No.3/4, p.1-106, Novi Sad, Dec. 2019.