

LOGISTIKA RECIKLAŽE RETKIH METALNIH MATERIJALA ZA IZRADU PERMANENTNIH MAGNETA HIBRIDNIH VOZILA

LOGISTICS OF RECYCLING OF RARE METAL MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF PERMANENT MAGNETS OF HYBRID VEHICLES.

Milojević S. *, Pešić R. **, Stojanović B. ***, Milojević I. ****, Miletić I. *****

REZIME

U okviru vozila je angažovana velika količina materijala, i to različitih vrsta metala i fluida, koji moraju biti proizvedeni iz obnovljivih sirovina i koji se moraju reciklirati. Na taj način, putem reciklaže vozila na kraju servisnog veka se smanjuje opterećenje okoline. U okviru rada je analizirana struktura procesa reciklaže vozila na hibridni pogon, sa posebnim osvrtom na reciklažu metala od kojih se sastoje permanentni magneti rotora i ostale elektro opreme na vozilu (kao što je NdFeB).

Ključne reči: Emisija, magneti, reciklaža, vozila na hibridni pogon

SUMMARY

Large amount of materials, various types of metals and fluids are engaged within the vehicle, which must be produced from renewable raw materials and which must be recycled. In this way, the recycling of vehicles at the end of their service life reduces the load on the environment.

The paper analyses the structure of the process of recycling hybrid vehicles, with special reference to the recycling of metals that make up the permanent magnets of the rotor and other electrical equipment on the vehicle (as it is neodymium magnet, NdFeB).

Keywords: Emissions, magnets, recycling, hybrid vehicles

* mr Saša Milojević, stručni savetnik. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, sasa.milojevic@kg.ac.rs

** dr Radivoje Pešić, prof. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka

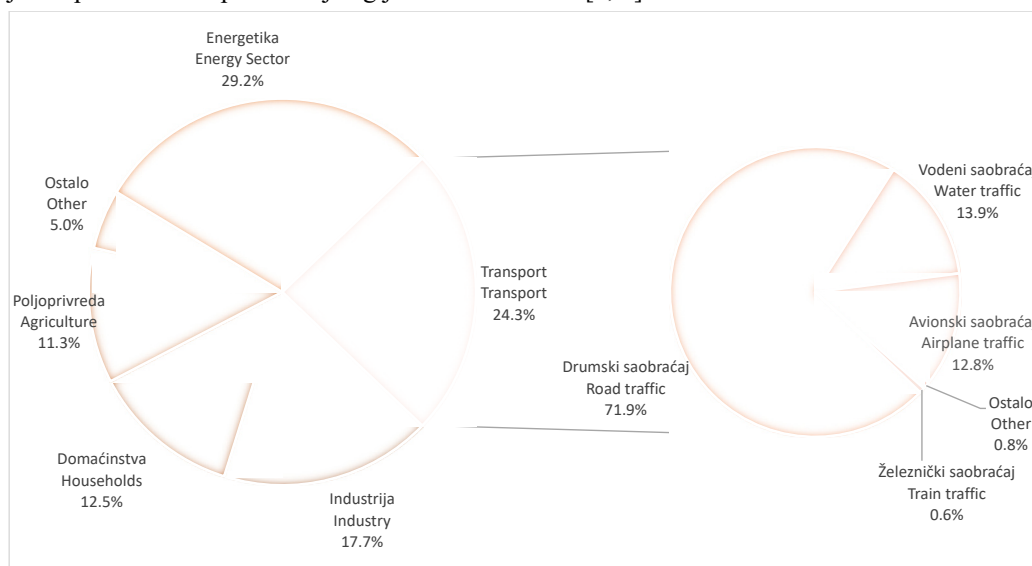
*** dr Blaža Stojanović, vanr. prof. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka

**** Ivana Milojević, MSc. Univerzitet u Kragujevcu

***** dr Ivan Miletić, doc. Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka

UVOD

Transportni sektor je odgovoran za jednu četvrtinu od ukupne emisije gasova staklene bašte u Evropskoj uniji. Glavni izvori emisije štetnih gasova su energetske sektor, sledi transport, industrija, domaćinstva, poljoprivreda i dr., sl. 1. Drumski saobraćaj je odgovoran za približno jednu petinu od ukupne emisije ugljen-dioksida u EU [1, 2].



Sl. 1 Emisija gasova staklene bašte po sektorima i udeo drumskog saobraćaja (EU28)

Fig. 1 Greenhouse gas emissions by sectors and presentation of the share of road traffic (EU28)

Primenom vozila na hibridni, kao i na električni pogon, može značajno da se doprinese smanjenju potrošnje energije i smanjenju emisije otrovnih gasova i troškova rada, uključujući i troškove goriva i održavanja. Međutim, vozila na električni pogon su trenutno skuplja imaju smanjen domet u poređenju sa klasičnim vozilima i zavise od ograničene infrastrukture za punjenje baterija, što nije slučaj sa vozilima na hibridni pogon [2, 3].

Takođe, za potrebe proizvodnje vozila, osim energije, angažuje se i velika količina materijala, različitih vrsta metala i fluida, koji moraju biti proizvedeni iz obnovljivih sirovina i koji se moraju reciklirati. Posebno u okviru hibridnih vozila, kao i vozila na električni pogon se koristi dosta retkih plemenitih i magnetnih metala, kao što su neodijumski magneti (NdFeB- neodijum gvožđe borid) itd., čije su rezerve iscrpne, i uglavnom su poreklom sa tržišta jedne države (više od 80% sirovina ovog materijala poreklom je iz Kine), zbog čega je njihovo snabdevanje otežano i skupo [4-6].

Činjenica je, da se u svetu paralelno sa povećanjem broja registrovanih vozila, povećava i broj otpisanih vozila (sa pogonom na klasična goriva, ali je i sve više vozila na hibridni i električni pogon). To su vozila na kraju servisnog veka (engl. end-of-life vehicles, ELV), i njihov broj se u mnogim državama statistički razlikuje od stvarnog broja objavljenih i ELV, koji se zvanično evidentiraju i objavljuju u zvaničnim dokumentima [7].

Preciznije rečeno, objavljeni vozila se direktnom trgovinom nelegalno preprodaju kao upotrebljavana trećim licima, i/ili se komercijalno izvoze u nerazvijene države, pa je zbog

neprecizne evidencije neophodno pojačati inspeksijske nadzore u ovoj oblasti. Zbog toga, vozila umesto da budu zamenjena novim i reciklirana u odgovarajućim pogonima, prema propisima, posle preprodaje završavaju u saobraćaju na putevima uglavnom država koje su u razvoju i nastavljaju da opterećuju okolinu ekološkim otpadom. Ista vozila nisu potpuno bezbedna za upotrebu u saobraćaju (zahtevaju učestalije i posebne tehničke kontrole i popravke).

Jedno od rešenja problema su ne samo ozbiljnije kontrole, već se rešenje može postići i putem odgovarajućih podsticaja za nabavku novih vozila (subvencije za preduzeća koja se bave reciklažom motornih vozila i njihovih delova, kao i za vlasnike ELV vozila). To se odnosi na određene finansijske podsticaje vlasnicima upotrebljivanih vozila za kupovinu novih (po sistemu zamene vozila staro za novo i sl.).

Na taj način, uređenim postupkom reciklaže ELV može da se smanji opterećenje okoline otpadom i mogu da se očuvaju rezerve materijala, posebno retkih metala. Reciklaža permanentnih magneta sa vozila na hibridni pogon zahteva rastavljanje mašinskog sklopa u okviru koga su ugrađeni na sastavne delove i oni se moraju nezavisno reciklirati.

POSTUPAK RECIKLAŽE MOTORNIH VOZILA

Godišnje u EU, odlaganjem vozila na kraju servisnog veka stvara se između osam i devet miliona tona otpada sa kojim se mora pravilno upravljati. Sa tog aspekta, Direktiva Evropskog parlamenta i Evropskog veća EU (2000/53/EC) uređuje mere i logistiku postupanja sa ELV u cilju zaštite čovekove okoline i očuvanja energije [8].

Reciklaža je aktivnost ponovne upotrebe već prerađenog materijala i na bazi njih dobijenih proizvoda. Motivi za reciklažu su: ekonomski, tehnički i ekološki. Smanjenje otpada kroz redukciju ili reciklažu ima veoma važan doprinos u očuvanju i zaštiti životne sredine. Ponovna upotreba proizvoda npr. od plastike omogućava produžen „životni ciklus”, što je ekološki i ekonomski vrlo isplativo.

Uspostavljanje standarda ISO 14001:2015 pomaže organizacijama da kroz sistem upravljanja zaštitom životne sredine u svojim procesima smanje i kontrolišu negativne uticaje i rizike u odnosu na životnu sredinu [9].

Postupak reciklaže vozila nakon prijema započinje procesom demontaže delova i opreme sa vozila. Demontaža obuhvata sakupljanje, uklanjanje nedozvoljenih primesa i drobljenje ELV, i generalno podrazumeva dva glavna pristupa:

- ♦ Prvo, postoje dokazi koji ukazuju na to da se sa ELV u nekim slučajevima nezakonito postupa. Međutim, mere za odlaganje rashodovanih vozila u državama gde su odjavljena iz upotrebe, kao što su povraćaj dela novca u vidu subvencija, pomogle bi smanjenju ilegalnih izvoza vozila; i
- ♦ Drugo, postoje dokazi koji ukazuju na to da čak i u ovlašćenim postrojenjima za reciklažu, odvajanje specifičnog otpada se ne vrši pravilno i nije u skladu sa zahtevima Direktive koja se odnosi na postupanje sa ELV. Određene vrste fluida u sistemima na vozilu, kao što su kočne tečnosti, tečnost za pranje vetrobranskog stakla, uljni filteri ili amortizeri, ne odlaze se u potpunosti na ekološki način. Na primer, zbog visokih troškova za ekološki tretman motornog ulja posle zamene, u servisima se vrlo često pristupa spaljivanju ulja u gorionicima za grejanje objekata ili dolazi do mešanja sa otpadnim vodama itd.

Međunarodnim standardom (ISO 22628:2002) je definisan postupak za izračunavanje procenta reciklabilnosti i ponovnog korišćenja ugrađenih materijala u okviru novog vozila, računato po

jedinici mase vozila. Metoda je usaglašena od strane proizvođača motornih vozila i primenljiva je za svako novo proizvedeno vozilo [10].

Procenat reciklabilnosti (R_{cyc}), ili (indikator reciklabilnosti) motornog vozila, predstavlja procenat mase (maseni udeo u procentima), i može se izračunati primenom sledeće jednačine (1):

$$R_{cyc} = \frac{m_P + m_D + m_M + m_{Tr}}{m_V} \cdot 100 \geq 95\% \quad (1)$$

Procenat ili indikator ponovnog korišćenja ugrađenih materija (R_{cov}), se računa primenom sledeće jednačine (2):

$$R_{cov} = \frac{m_P + m_D + m_M + m_{Tr} + m_{Te}}{m_V} \cdot 100 \geq 95\% \quad (2)$$

gde je:

m_P - Masa materijala koji se izdvajaju tokom procesa pripreme za reciklažu vozila; (sve tečnosti, baterije, filter za ulje, pneumatici, katalizatori, rezervoari za gorivo itd.);

m_D - Masa materijala koji se izdvajaju tokom procesa demontaže vozila (veliki, lako izmenljivi delovi od polimernih materijala i elastomera, kao što su branici, instrument table itd.);

m_M - Masa materijala koji se izdvajaju u toku procesa drobljenja i razdvajanja metala;

m_{Tr} - Masa nemetalnih materijala, koji se izdvajaju u toku procesa drobljenja.; i

m_{Te} - Masa ne metalnih materijala (polimerni materijali i elastomeri koji su teški za demontažu i lakši su od 100-200 g, respektivno), kao i drugi zapaljivi materijali (koža, drvo, čitači kartica, itd.).

Ovde je važno napomenuti, da bez obzira da li se proces izvodi sa prethodnom demontažom vozila, ili se vozila direktno dostavljaju na drobljenje, mora se pre bilo kog postupka izvršiti uklanjanje opasnih materija i materijala sa vozila koji mogu da ugroze životnu sredinu (engl. Depollution process). To je detaljnije propisano i definisano Aneksom I Direktive 2000/53/EC, član 6 [8].

Direktiva 2000/53/EC propisuje da sa otpadnih vozila moraju prvo da se uklone svi materijali i fluidi koji mogu da zagađuju životnu sredinu pa tek, nakon toga mogu biti poslata na otpad ili drobljenje. Aneks I Direktive 2000/53/EC specificira šta ovakav jedan postupak mora da uključuje [8]:

- ♦ uklanjanje akumulatora, rezervoara za klasična goriva (benzin i dizel) ili rezervoara za alternativna goriva (tečni naftni gas, bodonik, metan);
- ♦ neutralizacija i odlaganje ostalih potencijalno eksplozivnih komponenti (npr. vazdušnih jastuka, gasnih amortizera);
- ♦ izdvajanje i skladištenje goriva, motornih ulja, menjačkih ulja, ulja iz diferencijala, hidrauličkih ulja, tečnosti za hlađenje, ulja za kočenje, freona iz sistema za klimatizaciju vozila, kao i svih ostalih tečnosti i fluida koji se mogu naći u otpisanom vozilu. To se ne odnosi na pojedine fluide koji se nalaze u okviru mašinskog dela koji se ponovo upotrebljava, npr. kao rezervni deo; i

- ♦ izdvajanje komponenti koje sadrže živu i druge otrovne materijale.

Na taj način, planiranim postupkom reciklaže može da se pravilno izvrši razvrstavanje materijala od kojih se sastoji vozilo i njegova pripadajuća oprema. Proces je još složeniji, ako se uzme u obzir svakodnevna pojava na tržištu novih modela vozila, odnosno pogonskih i mobilnih sistema, čija je oprema sve složenija u pogledu strukture i načina funkcionisanja. Posebno kod vozila na hibridni i električni pogon, sa dosta specifične opreme kao što su baterije i elektromotori, planiranim postupkom reciklaže mogu da se ostvare velike uštede, kao i da se značajno doprinese očuvanju okoline.

RECIKLAŽA VOZILA NA HIBRIDNI POGON

Struktura vozila u pogledu ugrađenih materijala se sve više menja i sve je složenija sa pojavom novih modela. Sve više se primenjuju plastični materijali, kao što je polivinil hlorid (PVC) za izradu delova enterijera vozila, kao i aluminijum koji ne samo da se dokazano može potpuno reciklirati, već i reciklirani materijal zadržava u potpunosti sve polazne karakteristike.

U SAD npr., trend porasta primene aluminijuma traje preko 50 godina i prognozira se da će do 2028. godine u putničkim i lakim teretnim vozilima biti ugrađeno oko 256 kg ovog metala [11-13].

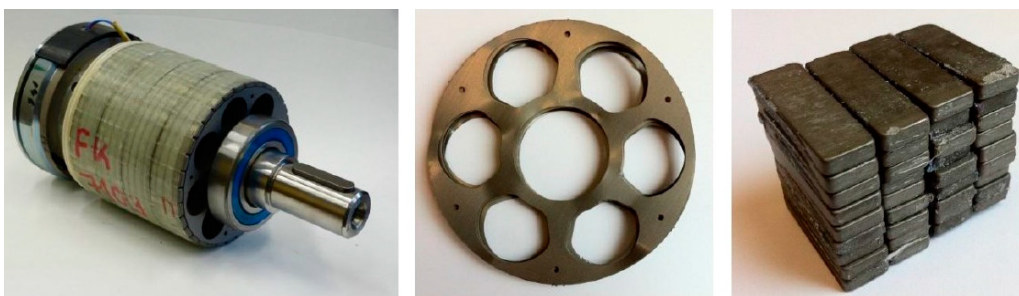
Primena hibridnih i vozila na električni pogon stvara sve veću potrebu za reciklažom ove vrste vozila, što zahteva određene promene u postojećim postupcima reciklaže zbog prisustva specifičnih uređaja i opreme kao što su: pogonske baterije, elektromotori i ostala prateća oprema [14].

Reciklaža pogonskih baterija nije unificirana, ali postoji preporuka da se baterije izrađuju od više modula, na koje se i rastavljaju pre reciklaže. Takođe, neophodno je tehnološki projektovati mesta za prihvatanje kućišta baterija zbog jednostavnije manipulacije prilikom ugradnje ili demontaže sa vozila.

Reciklaža elektromotora koja se izvodi u okviru klasičnih postrojenja nije efikasna. Klasičnim načinom reciklaže vozilo se potpuno drobi, seče i delovi se istope, zbog čega su materijali međusobno izmešani i sadrže određene primese. Ako se posmatraju elektromotori kojih ima sve više zbog intenzivne primene vozila na hibridni i električni pogon, onda se klasičnim postupkom uništavaju mnogi retki metali (magnetni i plemeniti). Prvenstveno to su neodijumski magneti (NdFeB- neodijum gvožđe borid), poreklom uglavnom sa tržišta Kine (preko 80%). Ovi magneti se koriste i za izradu industrijskih motora, vetro-generatora, električnih bicikla, hard diskova, audio opreme itd. [14].

Demontaža do nivoa statora i rotora elektromotora je ekonomski isplativa jer osnovne komponente (bakar, čelik, aluminijum) mogu da se dalje recikliraju konvencionalnim putevima reciklaže. Rotori koji sadrže magnetne prate put reciklaže čelika, tokom koga se gube retki metali i otpadaju kao šljaka. Zbog toga je demontaža magnetne pre same reciklaže neophodna, i osnovni je uslov da bi se došlo do retnih metala koje se moraju reciklirati. Na sl. 2 je prikazan demontiran rotor sa magnetima.

Posle postupka demontaže i, ako je potrebno, demagnetizacije, magneti se dalje mogu preraditi u pogonu za reciklažu.



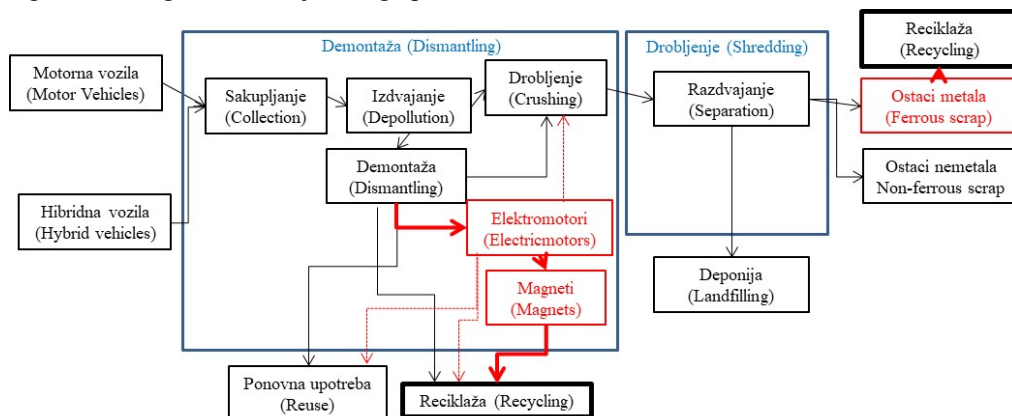
Sl. 2 Rotor, segment rotora i demontirani permanentni magneti (koji se montiraju na površini)
Fig. 2 Rotor, rotor segment and disassembled permanent magnets (surface mounted)

UPRAVLJANJE PROCESOM RECIKLAŽE VOZILA NA HIBRIDNI POGON

Činjenica je da vozila na hibridni pogon sadrže više delova i opreme (magneti, baterije, plemeniti metali u okviru elektronskih komponenti itd.), čiji su izvori iscrpni, zbog čega se moraju reciklirati odvojeno od ostalih delova vozila. U okviru rada je predložena organizacija procesa reciklaže vozila na hibridni pogon u prelaznom periodu, do izgradnje namenskih postrojenja za reciklažu ovakvih vozila i retkih materijala koji su ugrađeni u njihovu specifičnu opremu.

Neophodno je da se u toku procesa demontaže klasičnih vozila (sa pogonom na benzin ili dizel gorivo), isti postupak razdvoji na još jedan deo, odnosno na pogon za demontažu elektromotora i odvajanje permanentnih magneta za dalju reciklažu. Jedan deo materijala prilikom rastavljanja elektromotora se vraća nazad na osnovnu komunikacionu liniju do drobilice, posle čega se izdvajaju npr. plemeniti metali kao što je zlato itd., sl. 3 [14].

Na predloženi nači, izdvajanjem permanentnih magneta pre drobljenja, sprečava se njihovo mešanje sa drugim materijalima, što olakšava dalji postupak reciklaže i demagnetizacije, posle čega se ovi magnetni materijali mogu ponovo koristiti.



Sl. 3 Proces reciklaže vozila na hibridni pogon sa odvojenom linijom za reciklažu elektromotora i permanentnih magneta

Fig. 3 Hybrid-powered vehicle recycling process with a separate line for recycling electric motors and permanent magnets

Primenom predložene organizacione strukture u okviru postojeće proizvodne mreže, preduzeće za reciklažu motornih vozila sa motorima koji imaju pogon na klasična goriva se može dodatno prilagoditi za rastavljanje delova vozila na hibridni pogon. Integracijom dodatne mreže i pogona, izdvaja se proces reciklaže elektromotora i retkih permanentnih magneta.

ZAKLJUČCI

Primenom vozila na hibridni, ali i električni pogon, može da se doprinese smanjenju potrošnje energije i smanjenju emisije otrovnih gasova i troškova rada, uključujući gorivo i održavanje.

Činjenica je, da se u svetu paralelno sa povećanjem broja registrovanih vozila, povećava i broj otpisanih vozila (sa pogonom na klasična goriva i sve više na hibridni i električni pogon). To su vozila na kraju servisnog veka, ELV, čija se statistika ne prikazuje realno u mnogim državama širom sveta.

Godišnje u EU, odlaganjem vozila na kraju servisnog veka stvara se između osam i devet miliona tona otpada sa kojim se mora pravilno upravljati. Sa tog aspekta, Direktiva Evropskog parlamenta i Evropskog veća EU (2000/53/EC) uređuje mere i logistiku postupanja sa ELV u cilju zaštite čovekove okoline i očuvanja energije. Međunarodnim standardom (ISO 22628:2002) je definisan postupak za izračunavanje procenta reciklabilnosti i ponovnog korišćenja ugrađenih materijala u okviru novog vozila, računato po jedinici mase vozila.

Primena vozila na hibridni pogon neophodno je posebno upravljanje procesom njihove reciklaže, što zahteva određene promene u postojećim postupcima, zbog specifičnih uređaja i opreme kao što su: pogonske baterije, elektromotori i prateća oprema. Ako se posmatraju elektromotori, zaključak je da se klasičnim postupkom reciklaže uništavaju mnogi (magnetni i plemeniti) retki metali. Prvenstveno to su neodijumski magneti, koji se isporučuju uglavnom sa tržišta Kine (preko 80%).

Činjenica je da vozila na hibridni pogon sadrže delove i opremu (magneti, baterije, plemeniti metali u okviru elektronskih komponenti itd.), koji su retki i koji se moraju reciklirati odvojeno od ostalih delova vozila. Zbog toga, u okviru rada je predložena organizacija jednog takvog procesa reciklaže u prelaznom periodu, do izgradnje namenskih postrojenja za reciklažu ovih retkih materijala.

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.] European Commission: Reducing emissions from transport. A European Strategy for low- emission mobility, http://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en, pristupljeno: VIII 2020.
- [2.] Skrácaný T, Kendra M, Stopka O, Milojević S, Figlus T, Csiszár C (2019) Impact of the Electric Mobility Implementation on the Greenhouse Gases Production in Central European Countries. Sustainability 11:4948. <https://doi.org/10.3390/su11184948>
- [3.] Liimatainen, Heikki; van Vliet, Oscar; Aplyn, David (2019) The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis. Applied Energy 236, pp. 804-814, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>
- [4.] Elwert, T.; Goldmann, D.; Römer, F.; Buchert, M.; Merz, C.; Schueler, D.; Sutter, J. Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. Recycling 2016, 1, 25-60. <https://doi.org/10.3390/recycling1010025>
- [5.] Jin, H., Afiuny, P., McIntyre, T., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2016). Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling. In Procedia CIRP (Vol. 48, pp. 45–50). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.013>
- [6.] Reimer, M.V.; Schenk-Mathes, H.Y.; Hoffmann, M.F.; Elwert, T. Recycling Decisions in 2020, 2030, and

- 2040—When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU? *Metals* 2018, 8, 867. <https://doi.org/10.3390/met8110867>
- [7.] Agnieszka Merksiz-Guranowska (2020). A comparative study on end-of-life vehicles network design. *Archives of Transport*, 54(2). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.2971>
- [8.] Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles, 2008, Council of the European Union and European Parliament,
- [9.] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32000L0053&from=EN> pristupljeno: VIII 2020.
- [10.] S Milojevic et al 2019 Vehicles optimization regarding to requirements of recycling Example: Bus dashboard, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 659 012051,
- [11.] <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012051>
- [12.] ISO 22628:2002(en), Road vehicles — Recyclability and recoverability — Calculation method, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22628:ed-1:v1:en>
- [13.] Sandra Veličković, Blaža Stojanović, Lozica Ivanović, Slavica Miladinović, Saša Milojević 2019 Application of nanocomposites in the automotive industry, *Int. J. Mobility and Vehicle Mechanics (MVM)* 45(3) 51-64, <https://doi.org/10.24874/mvm.2019.45.03.05>
- [14.] Milojević S and Pešić R 2011 CNG buses for clean and economical city transport, *Int. J. Mobility and Vehicle Mechanics (MVM)* 37(4) 57-71,
- [15.] http://www.mvm.fink.rs/Journal/Archive/2011/2011V37N4/4_sasa_milojevic/milojevic_pesic_rad.pdf
- [16.] Bukvić M, Stojanović B, Ivanović L and Milojević S 2017 Recycling of the Hybrid and Electric Vehicles, *Acta Technica Corviniensis - Bulletin Of Engineering* 10(3) 107-114,
- [17.] <http://acta.fih.upt.ro/pdf/2017-3/ACTA-2017-3-16.pdf>
- [18.] Ivana Milojević (2020) Optimizacija komunikacijskih tokova procesa reciklaže vozila na električni pogon i njihove specifične opreme. Master rad, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka.

Rad primljen: 11.10.2020.

Rad prihvaćen: 17.10.2020.



Časopis Naučnog društva za pogonske mašine, traktore i održavanje
Journal of Scientific Society of Power Machines, Tractors and Maintenance

TRAKTORI I POGONSKE MAŠINE

TRACTORS AND POWER MACHINES

3/4

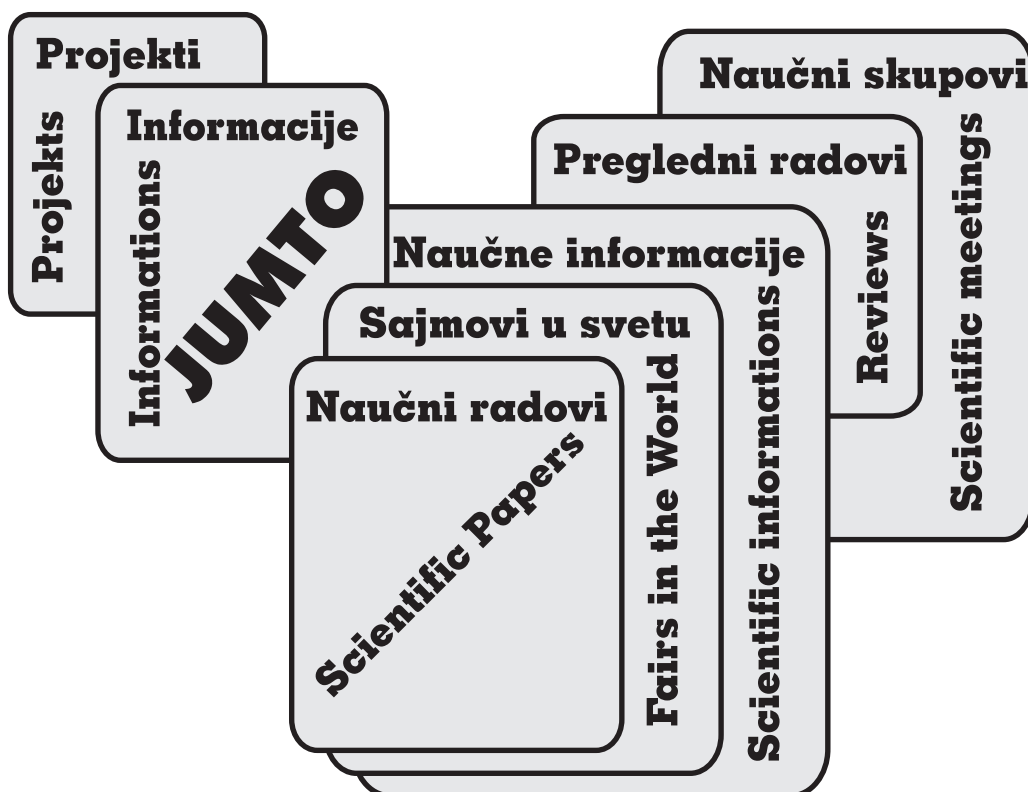
UDK 631.372

ISSN 0354-9496

Godina 25

Dec. 2020.

SADRŽAJ - CONTENTS



Novi Sad, Srbija

Trakt. i pog. maš., Trac. and pow. mach., Vol.25, No.3/4, p.1-89, Novi Sad, Dec. 2020.