

# Regeneracija kinetičke i potencijalne energije u industrijskim sistemima

Slobodan Lubura

Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, Republika Srpska, BiH  
slobodan.lubura@etf.ues.rs.ba

**Sažetak**— U ovom preglednom radu opisane su mogućnosti regeneracije energije u industrijskim sistemima (pogonima). Dat je osvrt na tri osnovna načina iskorištenja te regenerisane energije, te je ukazano na to da motorni pogoni koji se najčešće koriste u industriju moraju biti pogonjeni sa bidirekcionim pretvaračima energetske elektronike (*back to back*) da bi regeneracija bila moguća. Na primjerima jednostavnih pogona napravljena je analiza regeneracije kinetičke i potencijalne gravitacione energije.

**Ključne riječi**—*regeneracija energije; kinetička energija; potencijalna energija; bidirekcionni pretvarači energetske elektronike;*

## I. UVOD

Danas se gotovo polovina proizvedene električne energije u industrijskim sistemima pomoću elektromotornih pogona pretvara se u mehaničku energiju [1], [2]. Da bi se povećala energetska efikasnost ovih pogona danas se sve više primjenjuje koncept integralne optimizacije pogona kao ključne strategije, koja obuhvata pravilno dimenzionisane svih komponenti sistema, koje istovremeno moraju da imaju veliku efikasnost. Međutim, najveći potencijal uštede energije u industrijskim sistemima sa elektromotornim motornim pogonima povezana je sa smanjenjem snage potrebne za pokretanje radnog opterećenja putem kontrole brzine/momenta i/ili sa djelomičnim regeneracijom kinetičke/potencijalne energije koja je nagomilana u radnom opterećenju pogona. U ovom preglednom radu opisane mogućnosti regeneracije kinetičke i potencijalne energije radnih opterećenja kod elektromotornih pogona, koje omogućavaju bidirekcionni pretvarači energetske elektronike (EE) kojima se motori u industrijskim sistemima (pogonima) napajaju [3].

## II. MOGUĆNOSTI REGENERACIJE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POGONIMA

Regeneracija energije je veoma korisna opcija kod industrijskih sistema (pogona) gdje su radna opterećenja takve prirode da je u njima konzervirana (skoncentrirana) velika količina kinetičke ili potencijalne energije. Kod industrijskih pogona gdje imamo obrtno kretanje, u toku pokretanja ili ubrzavanja pogona dolazi do gomilanja kinetičke energije u zamajnim masama koje imaju velike momente inercije  $J$ , dok se kod dizanja tereta potencijalna gravitaciona energija gomila u masi samog tereta  $m$ , u zavisnosti od visine dizanja  $h$ . Ukoliko se za pogon radnog opterećenja u ovim sistemima

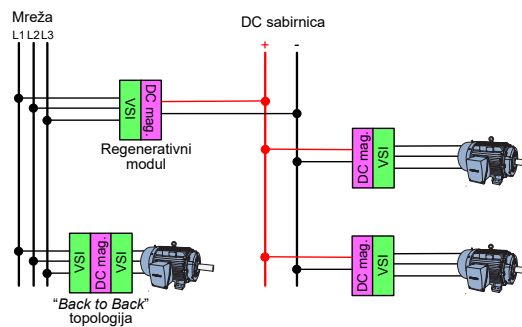
koristi električni motor onda je moguće dio nagomilane energije bilo da je ona kinetička ili potencijalna pomoću motora u fazama usporjenja ili kočenja pogona pretvoriti u električnu energiju. Naime, u tim fazama rada pogona električni motor može da radi u generatorskom režimu u drugom ili četvrtom kvadrantu i na taj način pretvara dio mehaničke energije u električnu. Međutim da bi se taj dio energija mogao ponovo koristiti električni motor mora biti napajan sa bidirekcionim pretvaračem EE koji radi bar u dva, a u najboljem slučaju u sva četiri kvadranta. U tom slučaju kažemo da imamo regenerativni pogon.

Efikasnost ovakvog jednog regenerativnog pogona jednaka je proizvodu efikasnosti  $\eta_k$  svih komponenti koje učestvuju u procesu regeneracije: efikasnosti motora  $\eta_{mot}$  koji radi u generatorskom režimu, efikasnosti invertora za pogon motora  $\eta_{invmot}$  koji radi u režimu kontrolisanog ispravljača i efikasnosti  $\eta_{invmreža}$  još jednog dodatnog invertora koji energiju iz DC međukola prebacuje u mrežu, a koji u ovoj složenoj topologiji bidirekcionog pretvarača EE (*back to back*) radi u invertorskom režimu. Ukoliko se kod složenog sistema, koga čine na primjer sistem sa više pokretnih stepenica i komponente za regeneraciju energije, koristi DC sabirnica sa koje se napajaju svi pretvarači EE za pogon motora onda u takvom konfiguracijama koristi dodatni regenerativni modul (inverter) koji će višak energije sa DC sabirnice prebaciti u mrežu. Ovaj regenerativni modul ne mora stalno biti u funkciji [4].

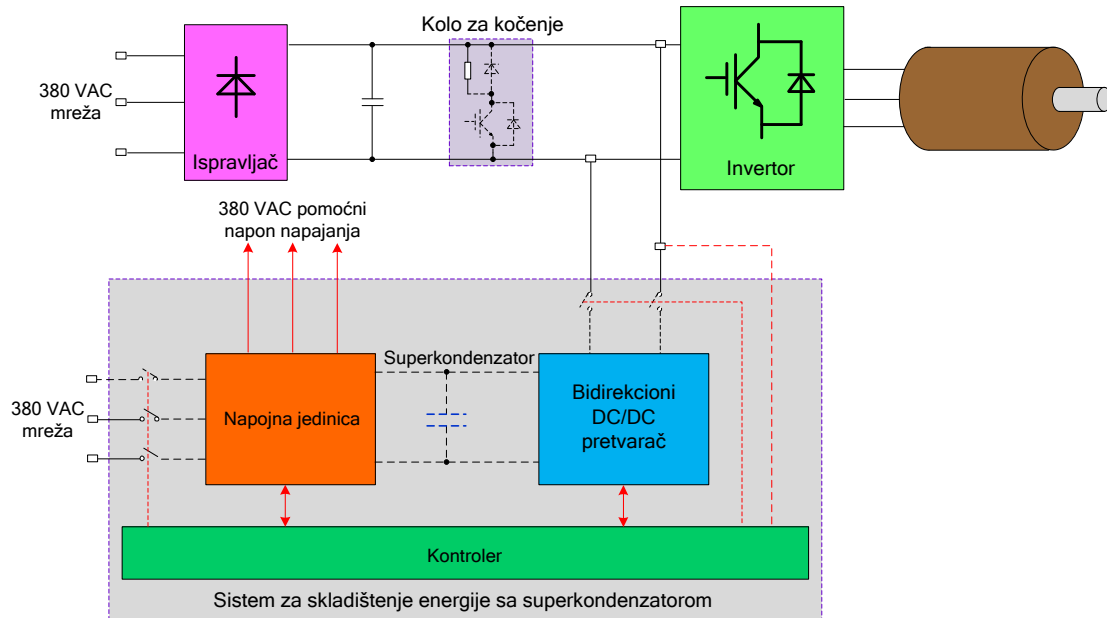
Regenerisana energija može se ponovo iskoristiti na tri načina:

1. prebacivanjem u mrežu,
2. prebacivanjem na zajedničku DC sabirnicu,
3. skladištenjem u baterije/superkondenzatore.

Prvi i drugi način prikazani su na slici 1, a treći na slici 2.



Sl. 1. Dvije različite strategije za regeneraciju energije



Sl. 2. Regeneracija energije skladištenjem u superkondenzatoru

Prvo se rješenje mnogo koristi u praksi, a količina regenerisane energija je ograničena maksimalnom snagom bidirekcionog pretvarača koju on može isporučiti u mrežu. Srednja vrijednost regenerisane snage koja se isporučuje u mrežu inverzno je proporcionalna periodu trajanja tog regenerativnog procesa.

Primjenljivost drugog rješenja zavisi od odnosa režima rada pogona, tj. od odnosa između motornog i generatorskog režima. Ukoliko je količina energije pogona u režimu kočenja tolika da se ne može potrošiti u pogonima koji rade u motornim režimima, onda se u rad mora uključiti regenerativni modul (Sl. 1.), koji će tu energiju sa DC sabirnice prebaciti u mrežu. Međutim, bez obzira na postojanje ovog regenerativnog modula, regenerativnim sistemima sa DC sabirnicom po pravilu iz preventivnih razloga se dodaje kolo kočionog otpornika na kome se disipira višak energije u DC međukolu.

Ukoliko regenerativni period relativno dugačak, onda primjena regenerativnih sistema sa superkondenzatorima (Sl. 2.) ili baterijama imaju potpuno opravdanje [5],[6],[7]. Energija se iz ovih sistema za skladištenje može vratiti motornom pogonu u fazama pokretanja i zalijetanja motora.

### III. REGENERACIJA KINETIČKE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POGONIMA

Kinetička energija koju posjeduje neko tijelo pri linearnom i obrtnom kretanju data je sa:

$$E_{lin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_{lin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

$$E_{obr} = \frac{1}{2}J\omega^2, E_{obr} = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (2)$$

gdje su  $m$  – masa tijela,  $v$  – linearna brzina,  $J$  – moment inercije tijela,  $\omega$  – ugaona obrtna brzina, respektivno.

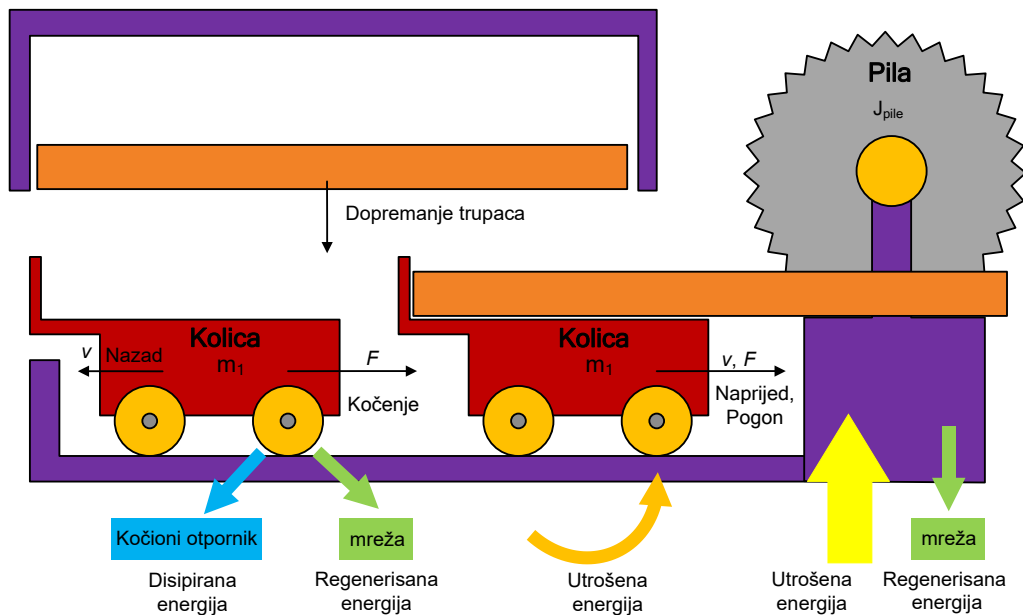
Kako pogoni u industrijskim sistemima dominantno imaju obrtno kretanje, iz izraza (2) može se zaključiti da kinetička energija kod industrijskih sistema (pogona) sa velikim zamajnim masama ( $J$  - inercija) kao radnim opterećenjem i/ili kod visokobrzinskih pogona ( $\omega^2$ ) može imati velike vrijednosti, te može iskoristiti za regeneraciju, odnosno investicija u regenerativni sistem može potencijalno biti dobro rješenje [7], [8].

Drugim riječima, značajan dio kinetičke energije koji se uskladišti u radnom opterećenju pogona (zamajnim masama) u toku njegove faze pokretanja (ubrzavanja) može se djelimično regenerisati u fazi zaustavljanja pogona, naravno ukoliko za to postoje pretpostavke. Ako pretpostavimo da se u industrijskim sistemima (pogonima) najviše koriste električni motori, funkcija regeneracije kinetičke energije ostvaruje se bidirekcionim pretvaračem energetske elektronike (EE) kojim se motor napaja. Ta energija pomoću ovih pretvarača može biti vraćena u mrežu, jednosmjernu sabirnicu ( $DC\ bus$ ) ili se može uskladištiti u baterijama ili super kondenzatorima, ako što je već napomenuto u uvodnom dijelu ovog rada.

U većini industrijskih pogona bez mogućnosti regeneracije kinetičke energije, korisnici izbjegavaju česta isključenja pogona i kad je on u ne opterećenom stanju, da bi uštedjeli vrijeme i dodatnu energiju koja je potrebna pri ponovnom pokretanju pogona. Na taj način se umanjuju i mehanička napreznja pogona koja smanjuju životni vijek komponenti pogona kao što su: zupčanici, remenice, ležajevi i sl.

#### A. Regeneracija kinetičke energije kod pogona pile

Mogućnosti uštede energije (novca) biće pokazan na primjeru regeneracije kinetičke energije kod pogona pile. Tako na primjer kod velikih pila za rezanje trupaca u pasivnom dijelu procesa rezanja, kada se kolica za dopremu trupaca pomjeraju u lijevo da bi se pripremila nova faza rezanja, pogon pile je i dalje aktivan i pila nastavlja da se obrće istom



Sl. 3. Pila za rezanje trupaca sa sistemom za njihovu dopremu

brzinom iako je neopterećena. Sličan scenario se dešava kod presa za velikim zamajnim masama i drobilicama. Ukoliko su ovi pogoni pogonjeni asinhronim kaveznim motorima uštedu energije bilo bi moguće napraviti kontrolom momenta motora ili kontrolom fluksa magnetizacije, što se izvodi jednostavnom regulacijom linijskog napona ili promjenom spoja statorskih namotaja [30], [31].

Kolica za dopremu trupaca na slici 1. predstavljaju jedan jednostavan primjer linearnog sistem kretanja gdje je moguće regenerisati dio kinetičke energije u fazi usporenja kretanja kolica u lijevo u odnosu na pilu. Prvo u toku faze rezanja trupca kolica guraju trupac ka pili i u zavisnosti od instalisanog postrojenja za rezanje trupaca taj proces može da traje od 5 – 20 s. U sljedećoj fazi kolica se vraćaju nazad da prihvate novi trupac za rezanje i to vrijeme trebalo bi biti što kraće da cijeli proces rezanja trupaca bio optimalan. Bez umanjenja opštosti, pretpostavimo da se masa kolica za dopremu trupaca kreće u granicama od 1- 6 t, a dužina puta kretanja kolica 5 -20 m.

Evidentno je, da kraće vrijeme kretanja kolica nazad (u lijevo od pile) zahtijeva što veće ubrzanje kolica i mali zaustavni put. Ukoliko pretpostavimo da je brzina kretanja kolica neposredno prije trenutka zaustavljanja  $v = 15 \text{ m/s}$  i masa kolica  $m = 6,000 \text{ kg}$ , kinetička energija koju posjeduju kolica u tom trenutku prema jednačini (1) data je sa:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot 6,000 \cdot (15)^2 = 675,000 \text{ J} = 675 \text{ kWs} = 0.1875 \text{ kWh} \quad (3)$$

Pretpostavimo da kolica dnevno do pile za rezanje dopreme do 500 trupaca, što iznosi 93,75 kWh/dnevno kinetičke energije pogona koja se potencijalno može regenerisati. Ukoliko pogon radi 300 dana u godini dolazi se do 28,125 kWh/godišnje. Ako uzmemo da je efikasnost regenerativnog pogona svega oko 50 % i iznosi 0.075 €/kWh,

skoro 1054.6 €/godišnje može biti uštedeno instalacijom sistema za regeneraciju.

#### IV. REGENERACIJA POTENCIJALNE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POGONIMA

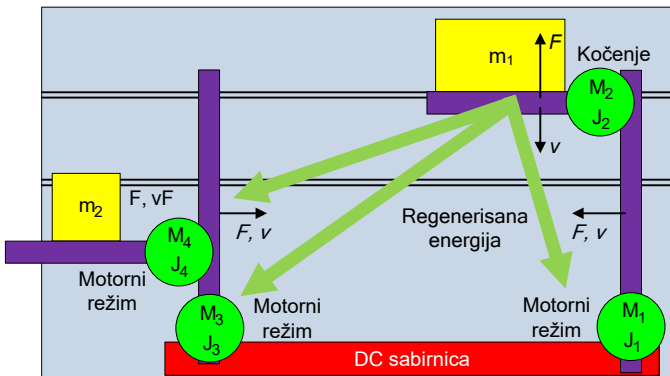
U potencijalnom gravitacionom polju, potencijalna energija data je izrazom:

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (4)$$

gdje su  $m$  – masa tijela,  $g$  – ubrzanje zemljine teže i  $h$  – visina na kojoj se tijelo nalazu u odnosu na referentnu tačku (visinu). Iz izraza (4) intuitivno je jasno, da svako tijelo podignuto na visinu  $h$  posjeduje potencijalnu energiju, koja se na neki način može regenerisati [1], [9]. Klasičan primjer sistema (pogona) sa mogućošću regeneracije potencijalne energije su liftovi, pokretne stepenice i različiti tipovi dizalica. U svim pomenutim sistemima mehanička energija (4) koja se utroši za podizanje mase  $m$  na visinu  $h$  ostaje konzervirana u masi tijela i može se djelimično regenerisati tokom spuštanja mase, naravno ukoliko se koristi regenerativni pogon. Kao primjer uzmimo da je kabina lifta mase od 800 kg podignuta na visinu od 30 m. Potencijalna energija konzervisana u kabini lifta iznosiće  $E_p = 235,440 \text{ J}$ , odnosno  $E_p = 65,4 \text{ Wh}$ . Pretpostavimo da se kabina lifta u toku jedne godine 6,000 puta podigne i spusti sa ove visine, što daje 392,4 kWh energije koja se potencijalno može regenerisati. Ukoliko se uzme da je efikasnost regenerativnog sistema 50 % uz cijenu kilovata energije 0.075 €/kWh dobije se 14.75 €/godišnje uštede.

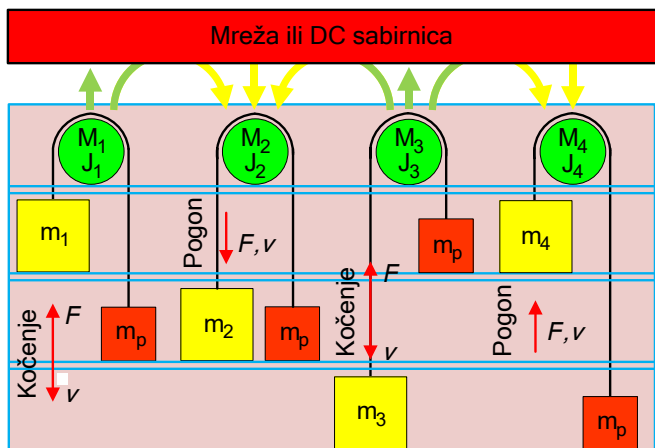
Na slici 2. dat je prikaz jednog sistema sa mogućošću regeneracije potencijalne energije. Sistem u osnovi čine dvije dizalice koje su pogonjene motorima M1, M2 i M3, M4 respektivno. Neka je svaki od motora pogonjen bidirekcionim pretvaračem EE koji radi u sva četiri kvadranta. Jedan od scenarija regeneracije potencijalne energije može biti sljedeći:

pri spuštanju tereta mase  $m_1$  motor dizalice M2 radi u regenerativnom režimu i preko bidirekcionog pretvarača vraća energiju u zajedničku DC sabirnicu i napaja motor M1 koji služi za translatorno pomjeranje dizalice. Takođe, na primjer preko zajedničke DC sabirnice mogu se napajati i motore M3 i M4 manje opterećene dizalice.



Sl. 2. Dvije dizalice povezane na DC sabirnicu

Ušteda potencijalne energije moguća je i kod liftova pri njihovom kretanju naniže, što je slučaj kada je težina kabine sa putnicima veća od težine protutega. Tada, obrtni moment motora ima suprotan znak od znaka brzine obrtanja motora, motor se nalazi u generatorskom režimu i regeneracija energije je moguća, uz pretpostavku da se motor lifta (PMSM) napaja iz bidirekcionog pretvarača. Isti princip važi i pri kretanju praznog lifta naviše. Tada se protuteg lifta kreće naniže i koči se motorom, koji ponovo preko bidirekcionog pretvarača energiju vraća u mrežu ili u zajedničku DC sabirnicu. Korištenjem regenerativnih pogona kod liftova može se uštedjeti od 40% do 50% energije.

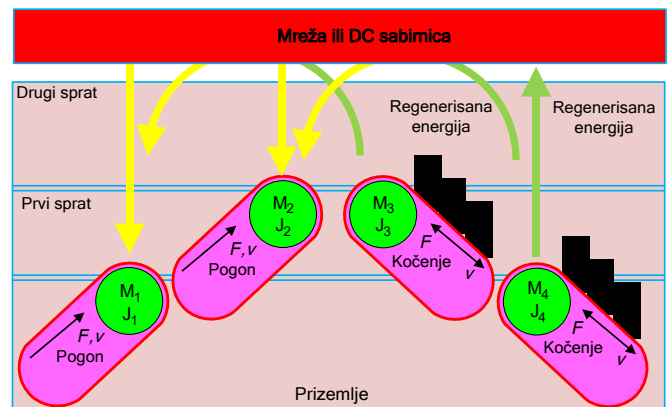


Sl. 3. Četiri lifta pogonjena bidirekcionim pretvaračima povezanih na mrežu ili DC sabirnicu

Mogućnost regeneracije energije pored dizalica i liftova postoji i kod pokretnih stepenica (elevatora). Na slici 4 prikaz je primjer jednog takvog sistema koji se sastoji od četvoro pokretne stepenice, od toga dvoje voze putnike naviše, a preostale dvoje naniže. Za pogon pokretnih stepenica koja voze putnike naviše ne postoji mogućnost regeneracije energije jer elektromotorni pogon radi samo u motornom režimu i pogoni se jednokvadrantnim pretvaračem EE.

Eventualna ušteda energije može se ostvariti start/stop režimom rada stepenica ili pogonima promjenljive brzine. Međutim, kod pokretnih stepenica koji voze putnike naniže postoji mogućnost regeneracije, jer tada elektromotorni pogoni mogu da rade u režimu kočenja/generisanja energije i preko dvokvadrantnih pretvarača EE dio energije regenerišu u mrežu ili DC sabirnicu. Ova energija dalje se može iskoristiti za pogon pokretnih stepenica koje voze putnike naviše, kao što je to prikazano na slici 4.

Postojanje DC sabirnice u ovim sistemima predstavlja nešto jeftinije rješenje, jer se u tom slučaju koriste pretvarači EE koji ne moraju imati spregu sa mrežom. Međutim, s druge strane, kod ovih jeftinih rješenja postoji opasnost pojave previsokog napona na DC sabirnici, uslijed viška regenerisane energije u sistemu. Problem se može riješiti na dva načina. Prvi način je korištenje kočionih otpornika za disipaciju viška regenerisane energije, što svakako smanjuje efikasnost cjelokupnog sistema, a drugi način je uključivanje u rad regenerativnog modula (dvokvadrantni pretvarač EE) koji će višak energije regenerisati u mrežu ili neki drugi sistem za smještanje energije (baterije ili superkondenzatori).



Sl. 4. Sistem sa četiri elevatora povezanih na mrežu ili DC sabirnicu

Takođe, treba napomenuti da je vrijednost trenja kod pokretnih stepenica koja voze putnike naniže jako velika, što ograničava mogućnosti regeneracije energije u ovakvim sistemima. Isti principi se mogu primijeniti za čekrke i kranove, s tim da u takvim sistemima ne postoje protutegovi, tako da je mogućnost regeneracije moguća samo pri spuštanju tereta naniže.

## ZAKLJUČAK

Iz navedene diskusije i datih primjera može se zaključiti da se pored kontrole brzine u pogonima što je već dokazano, značajna ušteda energije može se ostvariti i sistemima za regeneraciju energije. Ključnu komponentu sistema za regeneraciju energije čine bidirekciono pretvarači EE koji imaju mogućnost da rade najmanje u dva, a često je poželjno i u sva četiri kvadranta. Na kraju se može zaključiti da motorni pogoni koji su pogonjeni sa VSD (*variable speed drive*) pretvaračima, koji pored kontrole brzine pogona imaju sposobnost regeneracije energije pogona bilo u mrežu, DC sabirnicu ili u neki sistem za skladištenje predstavljaju budućnost primjene u industrijskim sistemima.

## LITERATURA

- [1] F. J. T. E. Ferreira and A. T. de Almeida, "Reducing Energy Costs in Electric-Motor-Driven Systems: Savings Through Output Power Reduction and Energy Regeneration," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 24, no. 1, pp. 84-97, Jan.-Feb. 2018. doi: 10.1109/MIAS.2016.2600685
- [2] T. Vaimann, A. Kallaste, A. Kilk and A. Belahcen, "Lifecycle-based design and optimization of electrical motor-drives - Challenges and possibilities," 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Istanbul, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1109/EPECS.2013.6713037.
- [3] A. Paugurs and A. Senfelds, "Design of a motor drive system for bidirectional DC power flow control," 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/RTUCON.2015.7343145
- A. de Almeida, F. Ferreira, and D. Both, "Technical and economical considerations to improve the penetration of variable speed drives for electric motor systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 188-199, Jan./Feb. 2005.
- [4] E. D. Mitronikas, D. V. Spyropoulos, N. P. Papanikolaou, E. C. Tatakis and N. Spyropoulos, "Energy saving during modern lift operation," 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, 2014, pp. 756-761. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960266
- [5] V. Zarikas, N. Papanikolaou, M. Loupis, N. Spyropoulos, "Intelligent Decisions Modelling for energy Saving in Lifts: An Application for Kleeman Hellas elevators", *Energy and Power Engineering*, Vol. 5, No. 3, May 2013, pp. 236-244.
- [6] Estanis Oyarbide, Ivan Elizondo, Abelardo Martínez-Iturbe, Carlos Bernal, Javier Irisarri "Ultracapacitor-based plug & play energyrecovery system for elevator retrofit", 21th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics, (ISIE'2011), Berkeley, California, USA, 7-10 Jun 2011, pp. 462-467.
- [7] I. Karatzaferis, E. C. Tatakis and N. Papanikolaou, "Investigation of Energy Savings on Industrial Motor Drives Using Bidirectional Converters," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17952-17961, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2748621
- [8] A. R. Rao, M. Mahesh and B. K. Keshavan, "Analysis of Energy during Regenerative modes," 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707455
- [9] T. Wang and Q. Wang, "Optimization Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Potential Energy Recovery System," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 856-863, Dec. 2012. doi: 10.1109/TEC.2012.2211080

## ABSTRACT

This paper describes the roads of energy regeneration in industrial systems (plants). Three basic ways of utilizing this regenerated energy are outlined, and it is pointed out to make regeneration possible, the electrical motor as most commonly used drive in industry must be powered by bidirectional power electronics converters (back to back). On the examples of simple drives, an analysis of the regeneration of kinetic and potential gravitational energies were done.

## REGENERATION OF KINETIC AND POTENTIAL ENERGY IN INDUSTRIAL SYSTEMS

Slobodan Lubura