

## ПОБОЉШАЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ У ПУМПНОМ ПОСТРОЈЕЊУ КОРИШЋЕЊЕМ ФРЕКВЕНТНОГ РЕГУЛАТОРА

Раденко Марјановић, *Arcelor Mittal Prijedor, d.o.o. Prijedor, Приједор, Босна и Херцеговина*  
Петар Матић, *Електротехнички факултет Бања Лука, РС Бања Лука, Босна и Херцеговина*

**Садржај** – Овај рад презентује студију побољшања енергетске ефикасности рудничког пумпног постројења коришћењем средњенапонског фреквентног регулатора. Истражено је како се смањењем брзине обртања, које је могуће остварити због предимензионисаности пумпе и погонског синхронног мотора у односу на тренутни проток утиче на смањење утрошене енергије, хабање пумпе, те смањење струјних и хидрауличних удара при стартовању мотора и пумпе. Студија показује да се уградњом одговарајућег регулатора брзине могу остварити значајне уштеде електричне енергије.

### 1. УВОД

Утрошена електрична енергија електромоторних погона индустријских пумпних система у рачунима за утрошену електричну енергију заузима 25 % до 50 % укупне утрошене електричне енергије. Постоји могућност да се утрошак електричне енергије за потребе рада пумпног система смањи путем одговарајућег пројектовања и избора пумпног система и контроле. Рад пумпе са промјенљивим протоком или лошим избором пумпе (предимензионисање) уобичајено захтјева коришћење вентила за пригушење, бајпаса и/или мотора са промјенљивом брзином да би се добио жељени проток. Вентил за пригушење је извор вибрација и буке, на њему настају губици енергије, а прате га и проблеми везани за одржавање као што су запушавање материјала, кавитација, цурење, и оштећења усљед корозије. Најефикаснији начин манипулације протоком је подешавање брзине пумпе.

Циљ рада је да истражи до које границе би се могла смањити брина обртања мотора, односно пумпе, а да се при том не наруши потребна висина дизања пумпе. Након тога ће се извршити анализа колика уштеда се може очекивати у потрошњи електричне енергије, смањењу трошкова одржавања машинског и електричног подсистема и како нови режим рада пумпе утиче на смањење хидрауличног удара.

### 2. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ СИСТЕМА

За потребе препумпавања муља из пумпне станице муља у руднику ArcelorMittal Prijedor користи се центрифугална пумпа коју покреће синхронни мотор снаге 1250 kW и номиналне брзине 500 ob/min. Капацитет пумпе је 3800 m<sup>3</sup>/h, а доток муља из система у пријемни базен, односно у пумпу је око 2200 m<sup>3</sup>/h. Пумпа кроз муљовод дужине 5465,27 m и унутрашњег пречника 700 mm препумпава муљ у акумулационо језеро Градина. Висинска разлика између осе излазне цијеве пумпе и осе

цијеве на акумулационом језеру износи 46,73 m. Шема пумпног система и муљовода приказана је на слици 1.



Слика 1. Шема пумпног система и муљовода

Због већег капацитета пумпе од дотока муља у пумпну станицу, регулација протока се врши пригушењем вентила. Котао за компензацију хидрауличног удара (приказан на слици 1) служи за смањење хидрауличног удара, односно смањења притиска у муљоводу.

Муљ из рудника се препумпава пумпом ГРТ 4000/71а, чији је капацитет 3800 m<sup>3</sup>/h при 485 ob/min. Пумпу покреће синхронни мотор СДНЗ-16-41-12у3 номиналне брзине 500 ob/min, снаге 1250 kW и напона 6000V. Мјерењем је утврђено да мотор при раду узима из мреже 1100 kW [1]. Манометарска висина дизања је:

$$H_m = H_g + H_l \quad (1)$$

Гдје су:

$H_m$  - манометарска висина дизања [m];

$H_g$  - геодетска висина дизања [m];

$H_l$  - линијски губици у муљоводу [m].

Геодетска висина дизања при запуњености пријемног базена од 6 m је:

$$H_g = 46,73 - 6 = 40,73m \quad (2)$$

Линијски губици у муљоводу промјера цијеве  $D=700mm$  и протока  $Q=2200m^3/h=0,6111m^3/sec$  се рачунају на основу [2]:

$$H_l = H_t + H_k \quad (3)$$

Гдје су  $H_t$  линијски губици усљед трења, а  $H_k$  губици усљед прелома (кољена). Губици усљед прелома зависе од броја прелома на муљоводу и угла прелома. Ти губици су доста мањи у односу на линијске губитке и врло мало се мијењају при промјени протока, тако да при протоку од  $Q=2200m^3/h=0,6111m^3/sec$  они износе  $H_t \approx 0,7m$ , односно при протоку  $Q=1900m^3/h=0,528m^3/sec$  износе  $H_t \approx 0,5m$ . Средња брзина кретања флуида једнака је:

$$v_{sr} = \frac{Q}{F} = \frac{0,6111}{0,3848} = 1,588 \frac{m}{sek} \quad (4)$$

гдје је  $F$  површина пресека цијеве у m<sup>2</sup>. Коэффициент трења  $\lambda$  рачуна се на основу формуле из [2] и једнак је:

$$\lambda = 0,012 + \frac{0,0018}{v_{sr} \cdot D} = 0,012 + \frac{0,0018}{1,588 \cdot 0,7} = 0,0136 \quad (5)$$

Гдје је  $D$  промјер цијеве.

Укупно, линијски губици услед трења износе:

$$H_t = \lambda \frac{l v_{sr}^2}{D 2g} \gamma = 0,0136 \frac{5465,27 \cdot 1,588^2}{0,7 \cdot 2 \cdot 9,81} \cdot 1,03 = 14,06m \quad (6)$$

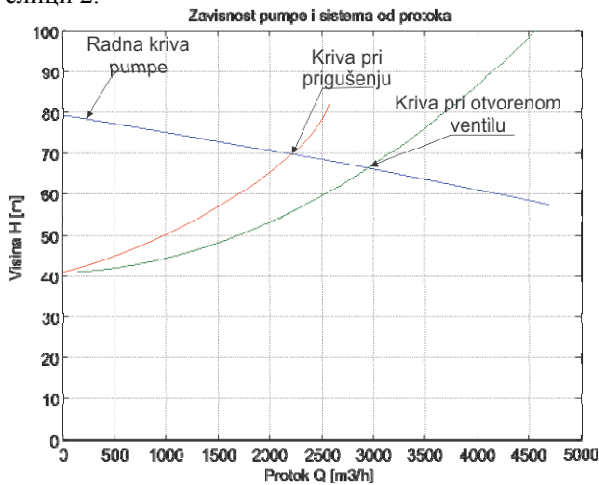
гдје су  $l$  дужина муљовода,  $g$  убрзање Земљине гравитације и  $\gamma$  запреминска тежина смјесе (муља). Манометарска висина дизања пумпе за проток  $Q=2200m^3/h=0,6111m^3/sec$  је:

$$H_m = H_g + H_t + H_k = 40,73 + 14,06 + 0,7 = 55,49m \quad (7)$$

На основу радног дијаграма из [3] и коришћењем функције *polyfit* програмског пакета *Matlab* добија се функција која описује висину дизања пумпе у зависности од протока, односно:

$$H = -2,014Q^2 - 12,259Q + 79,285 \quad (8)$$

Радна крива пумпе, крива система са отвореним вентилом и крива система са пригушењем приказани су на слици 2.



Слика 2. Зависност величина пумпног система од протока

Хидраулична снага  $P_{hid}$  тј. корисна снага коју пумпа предаје флуиду зависи од специфичне густине течности  $\rho$ , висине дизања пумпе и протока, односно:

$$P_{hid} = \rho g H Q = 1037 \cdot 9,81 \cdot 70 \cdot 0,6111 = 435,17kW \quad (9)$$

Гдје су  $\rho=1037kg/m^3$  густина муља,  $g=9,81m/sec^2$  убрзање Земљине теже,  $H=70m$  висина дизања пумпе при пригушеном вентилу (очитање са манометра на излазу пумпе је око 7 бара) и  $Q=0,6111m^3/sec$  проток. Укупна ефикасност оваког пумпног система је:

$$\eta_{ukup.} = \frac{P_{hid}}{P_1} = \frac{435,17 \cdot 10^3}{1100 \cdot 10^3} = 0,396 \quad (10)$$

Снага  $P_1$  је електрична снага коју мотор узима из мреже. Укупна ефикасност система једнака је

$$\eta_{ukup} = \eta_{mot} \cdot \eta_{pump}$$

### 3. ПРОРАЧУН ПОТРЕБНЕ БРЗИНЕ ПУМПЕ

За регулацију протока могу да се користе различите методе, а у конкретном случају пумпног система користи се регулација помоћу вентила, односно пригушењем. На овај начин повећавају се губици јер вентил пригушење остварује тако што увећава трење. Енергетски најбољи начин регулације протока је промјена брзине мотора тј. пумпе. Да би се одредила оптимална брзина конкретне пумпе потребно је познавати зависности величина пумпе од промјене брзине.

$$Q \sim n \quad (11)$$

$$H \sim n^2 \quad (12)$$

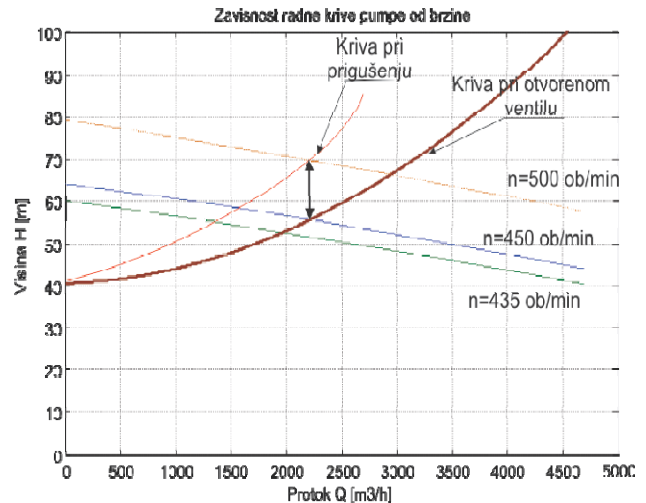
$$P \sim n^3 \quad (13)$$

Посматрају се два радна режима пумпе. Пумпа је у 2012. години радила око 4800 радних часова. Од тога је 4100 радних часова радила при стандардном режиму рада постројења (доток муља  $Q=2200m^3/h=0,6111m^3/sec$ ), а 700 радних часова је радила при режиму филтрације постројења (доток муља  $Q=1900m^3/h=0,528m^3/sec$ ). На основу једначина (2-6) и једначина (11) и (12) подаци за посматране протоке приказани су у Табели 1.

Табела 1. Оптималне величине пумпног система за посматране карактеристичне протоке

	$H_g$ [m]	$H_t$ [m]	$H_k$ [m]	$\lambda$	$v_{sr}$ [m/s]	$n$ [ob/min]
$Q=2200m^3/h$	40,73	14,06	0,7	0,0136	1,588	450
$Q=1900m^3/h$	40,73	10,65	0,5	0,0138	1,372	435

На слици 2 приказане су радне криве пумпе при брзинама обртања 450 ob/min, односно 435 ob/min.



Слика 2. Зависност радне криве пумпе од брзине

Из једначине (13) види се да снага зависи од трећег степена брзине. При новим брзинама, добија се да мотор из мреже узима следеће снаге:

$$\left. \begin{matrix} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{450} \sim n_{450}^3 \end{matrix} \right\} = \left. \begin{matrix} 1100 \cdot 10^3 \sim 500^3 \\ P_{450} \sim 450^3 \end{matrix} \right\} \Rightarrow P_{450} = 1100 \cdot 10^3 \left( \frac{450}{500} \right)^3 = 802kW \quad (14)$$

$$\left. \begin{matrix} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{435} \sim n_{435}^3 \end{matrix} \right\} = \left. \begin{matrix} 1000 \cdot 10^3 \sim 500^3 \\ P_{435} \sim 450^3 \end{matrix} \right\} \Rightarrow P_{435} = 1000 \cdot 10^3 \left( \frac{435}{500} \right)^3 = 659kW \quad (15)$$

Мотор при протоку  $Q=1900m^3/h=0,528m^3/sec$  из мреже узима 1000kW. На бази једначине (9) хидрауличне снаге за протоке и одговарајуће висине  $(Q;H)=(2200; 55,5)$ ,  $(Q;H)=(1900; 52)$  су респективно:

$$P_{hid1} = \rho g H_1 Q_1 = 1037 \cdot 9,81 \cdot 55,5 \cdot 0,6111 = 345kW \quad (16)$$

$$P_{hid2} = \rho g H_2 Q_2 = 1037 \cdot 9,81 \cdot 52 \cdot 0,528 = 280 kW \quad (17)$$

Укупни степен искоришћења за два нова режима је:

$$\eta_{uk1} = \frac{P_{hid1}}{P_{450}} = \frac{345 \cdot 10^3}{802 \cdot 10^3} = 0,43 \quad (18)$$

$$\eta_{uk2} = \frac{P_{hid2}}{P_{435}} = \frac{280 \cdot 10^3}{659 \cdot 10^3} = 0,425 \quad (19)$$

У укупном степену искоришћења два нова радна режима фигурише и степен искоришћења фреквентног регулатора којим се регулише промјена брзине тј.  $\eta_{uk1/2} = \eta_{pump} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{frek.reg}$ . Прорачун показује да очекивано увећање степена искориштења снаге за два радна режима у односу на (10) износи 0,034, односно 0,029.

#### 4. УШТЕДЕ И РОК ОТПЛАТЕ

Поред очигледне уштеде у електричној енергији при регулацији брзине фреквентним регулатором остварују се и уштеде у одржавању, како електро тако и машинском одржавању пумпног система. На овај начин, уштеде регулацијом брзине могу се сврстати на:

1. уштеде одржавања и
2. уштеде електричне енергије.

Доминантан сегмент трошкова у одржавању пумпног система је машински дио. Тренутно се значајан износ на годишњем нивоу (око 100.000 БАМ) троши на одржавање и замјену дијелова пумпе и вентила. Због тренутног рада са пригушењем долази до оштећења вентила. Такође долази до кавитације у пумпи што доводи до њеног оштећења, посебно радног кола. Регулацијом брзине фреквентним регулатором смањују се притисак и кавитација у пумпи. Такође, на овај начин се регулише и проток, што омогућава да вентил буде потпуно отворен.

Са електротехничке стране добре особине регулацијом брзине фреквентним регулатором су „мекан“ старт (полазна струја се може одржавати на прихватљивој вриједности од  $1,5I_n$ ), а и мања је струја у трајном раду. На овај начин су елиминисани и струјни удари на мрежу при старту, а и механички удари на мотор и пумпу који доприносе оштећењу механичких дијелова.

Све ово наведено смањује трошкове одржавања. На основу [3] и [4] очекиване уштеде одржавања су за трећину мање, односно за око 30.000 БАМ.

Уштеде у електричној енергији у два нова радна режима су:

$$\Delta P_{450} = P_{500}^{(1)} - P_{450} = 1100 - 802 = 298 kW \quad (20)$$

$$\Delta P_{435} = P_{500}^{(2)} - P_{435} = 1000 - 659 = 341 kW \quad (21)$$

Како пумпа током године ради са протоком  $Q=2200 m^3/h$  око 4100 часова и са протоком  $Q=1900 m^3/h$  око 700 часова, а цијена за потрошену електричну енергију је 0,065 ВАМ/kWh, очекиване уштеде електричне енергије промјеном брзине за ова два режима су:

$$C_{el} = \Delta P_{450} \cdot c_e \cdot T_1 = 298 \cdot 0,065 \cdot 4100 = 79417 \text{ ВАМ} \quad (22)$$

$$C_{el} = \Delta P_{435} \cdot c_e \cdot T_1 = 341 \cdot 0,065 \cdot 700 = 15515 \text{ ВАМ} \quad (23)$$

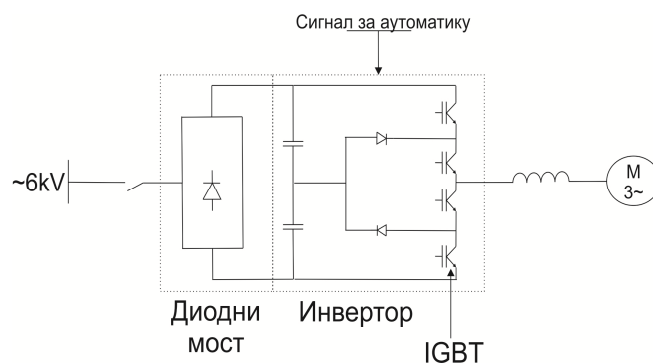
Укупна уштеда у електричној енергији и одржавању при регулацији брзине пумпе фреквентним регулатором је:

$$C_e^{ukupn} = C_{el} + C_{odz} + C_{odz} = 79417 + 15515,5 + 30000 = 124935 \text{ ВАМ} \quad (24)$$

Из (24) видимо да су очекиване укупне уштеде у електричној енергији и одржавању око 125.000 БАМ на годишњем нивоу.

#### 5. ТЕХНОЛОШКА РЕАЛИЗАЦИЈА ПУМПНОГ СИСТЕМА СА ФРЕКВЕНТНИМ РЕГУЛАТОРОМ

Као примјер за један начин реализације за регулацију брзине користиће се средњенапонски фреквентни регулатор *Schneider Electric Altivar 1000*. Фреквентни регулатор је посебно пројектован за регулацију брзине синхроног мотора. За аутоматизацију регулације брзине *Altivar 1000* има *PID* регулатор који регулише брзину мотора на основу нивоа воде у пријемном базену. Податке о нивоу воде *PID* регулатор добија помоћу сонде која се налази на дну пријемног базена. Шема везивања фреквентног регулатора *Altivar 1000* и мотора приказана је на слици 3.



Слика 3. Шема везивања фреквентног регулатора *Altivar 1000* и мотора

Основне карактеристике фреквентног регулатора *Altivar 1000* су ефикасност регулатора преко 98%, гаранција рада без квара до 50000 радних часова и коришћење *IGBT* прекидачке технологије [5]. Коришћењем *IGBT* прекидачке технологије добија се:

- Повећана поузданост услед смањења броја компоненти,
- Минимизирају се губици зато што *IGBT* не користе заштиту од транзијентних појава и захтјевају врло малу окидачку снагу,
- Нема пулсирајућег момента,
- Минимизирају се хармоници према мотору,
- Безбједност система: струја квара се искључује тренутно.

Према подацима „n“ произвођача, цијена фреквентног регулатора *Altivar 1000* са уградњом и пуштањем у погон је око 120000 BAM.

## 6. ЗАКЉУЧАК

У раду је истражено како коришћење фреквентног регулатора за регулацију брзине синхроног мотора, односно центрифугалне пумпе утиче на смањење трошкова одржавања пумпног система и потрошње електричне енергије.

Показано је како губици центрифугалне пумпе зависе од вриједности протока и висине дизања у посматраном систему за неколико карактеристичних радних тачака. Рачунским путем доказане су уштеде у одржавању и уштеди електричне енергије регулацијом брзине обртања мотора фреквентним регулатором, односно регулацијом протока за два карактеристична радна режима пумпног система. Такође коришћењем фреквентног регулатора добија се „мекан“ старт мотора и смањују се механички удари на мотор и центрифугалну пумпу, као и вршна електрична снага која се узима из мреже при покретању.

Поређењем очекиваних вриједности уштеда коришћењем фреквентног регулатора са потребном цијеном улагања у овај систем, види се да се инвестиција отплаћује за око годину дана.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Раденко Марјановић, „Моделовање и анализа рада високонапонског синхроног мотора у погону помпне станице“, Завршни рад другог циклуса студија, Електротехнички факултет Бања Лука, 2013.
- [2] Глави рударски пројекат – Муљовод, Рударско металуршки комбинат Зеница, Приједор, 1982.
- [3] Technical and accompanying document for 4000/71&4000/71a, USSR, 1982.
- [4] UQ-75-03/21 Упутство руковањем пумпном станицом муља, ArcelorMittal Prijedor, 2005.
- [5] Altivar 1000 Medium-voltage variable speed drive 0.5 to 10 MW, Schneider Electric, 2008.

**Abstract** - This paper presents a study to improve energy efficiency in mining pumping plant using medium voltage frequency converter. Investigated how reducing the speed of rotation, which is possible due to overcapacity of the pump and drive synchronous motor with regard to the current flow, impact on reducing consumed power, pump wear and reduce electrical and hydraulic strikes when starting motor and pump. The study shows that the installation of the appropriate speed controller can achieve significant energy savings.

### **Improving energy efficiency in pumping plant using frequency converter**

Marjanović Radenko  
Matić Petar