



Consumption of Electrical Energy in Turning Operations

Potrošnja električne energije kod obrade struganjem

O. Spaić¹, A. Koprivica^{1*}, B. Marinović¹, Lj. Kovačević

¹ Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, Vojvode Stepe Stepanovića bb, Trebinje, Bosna i Hercegovina

Abstract: In times of increased energy consumption, more and more attention is being paid to finding solutions for its saving. In order to cope with serious situations, such as the rising price of energy, global depletion of resources and climate warming, and the improvement of energy efficiency in industries, the need to conserve energy and its sustainability, and to reduce the emission of damaging gases, is an inevitable trend. Energy efficiency remains one of the main issues in the field of machining. Today's machining systems face a number of new challenges, such as turbulent product demand and variations in production resources. Machining systems consisting mainly of machine tools are numerous and used in a wide range of applications in industry, which typically exhibit very low energy efficiency, and as a result, have great potential for energy savings and reduction of environmental emissions. As machine tools are the basic device that consumes energy in manufacturing industries, as an imperative, the need for optimization of input parameters of machines and modeling of energy consumption is imposed, and this creates prerequisites for saving energy in production. This paper investigates energy consumption in the field of turning operations, as one of the main factors in building a sustainable future of machining, depending on the input technological parameters of machining.

Keywords: turning, energy, technological parameters

Apstrakt: U vremenu povećane potrošnje energije, sve se više pažnje poklanja iznalaženju rješenja za njenu uštedu. Da bi se izborili sa ozbiljnim situacijama, kao što su rastuća cijena energije, globalno iscrpljivanje resursa i klimatske promjene, te poboljšali energetska efikasnost u industrijama, kao neizbježan trend nameće se potreba za očuvanjem energije i njenom održivosti, te smanjenjem emisije štetnih gasova. Energetska efikasnost je jedno od glavnih pitanja i u domenu mašinske obrade. Današnji obradni sistemi su suočeni sa brojnim izazovima, kao što su turbulentna potražnja za proizvodima i varijacije u proizvodnim resursima. U okviru obradnih sistema se koriste brojni mašinski sistemi u širokom spektru aplikacija, koje obično pokazuju veoma nisku energetska efikasnost. Kao rezultat toga, mašinski sistemi imaju veliki potencijal za uštedu energije i smanjenje emisija štetnih gasova u životnu sredinu. Kako su alatne mašine sa svojim instalacijama i agregatima osnovni podsistem svakog mašinskog sistema koji troši najviše energije u obradnim sistemima, kao imperativ, nameće se potreba za optimizacijom ulaznih parametara i modeliranjem potrošnje energije, te se na taj način stvaraju preduslovi za uštedu energije u proizvodnji. U ovom radu je, na osnovu eksperimentalnih mjerenja, izvršena analiza i postavljen model potrošnje energije u zavisnosti od ulaznih parametara pri mašinskoj obrade struganjem.

Ključne riječi: struganje, energija, tehnološki parametri

1 UVOD

Proizvodne industrije koriste električnu energiju kako bi pripremak pretvorili u finalni proizvod ili

poluproizvod, a istovremeno proizvode visoku emisiju štetnih gasova. Ove industrije čine preko 60% ukupne svjetske potrošnje energije, dok 70% ukupnog svjetskog

*aleksandra.koprivica@fpm.ues.rs.ba

zagađenja dolazi od proizvodnih industrija iz Kine [1-3]. Slično tome, u SAD-u, proizvodni sektor čini oko 90%, a sektor mašinske obrade čini oko 83% ukupne industrijske potrošnje energije [4]. Očekivanja su da će globalna potražnja za energijom porasti za 53% u periodu do 2035. godine [5], dok će Kina i Indija, dvije vodeće industrijske zemlje, više nego udvostručiti potražnju za energijom. S toga je neophodno identifikovati metode za procjenu potrošnje proizvodne energije, te na taj način iznaći adekvatan prijedlog efikasne i realne strategije za smanjenje potrošnje prirodnih resursa.

Kao glavana oprema u proizvodnji, alatne mašine imaju mnoge funkcionalne cjeline, kao što su: pogonski sistemi, upravljački sistemi, kontrolni sistemi, pomoćni sistemi, rezni alati, sistemii za stezanje itd. Tako elektromotori obezbjeđuju pravolinijsko ili rotaciono kretanje, hidraulički sistemi obezbjeđuju sile stezanja, sistem za hlađenje i podmazivanje obezbjeđuje dovođenje tečnosti za hlađenje i podmazivanje, nosači alata automatsku zamjenu alata itd. Prema tome, alatna mašina, kao „majka“ svih alatki ima visoku potrošnju električne energije, ali uz malu energetska efikasnost [6]. S toga se veliki broj naučnika bavi uspostavljanjem preciznih modela optimalne potrošnje električne energije.

Gutovski i ostali [7] su u svom radu istakli da se optimizacijom parametara obrade, smanjenjem praznog hoda mašine, te poboljšanjem ukupne energetske efikasnosti znatno utiče na smanjenje potrošnje električne energije i samim tim se postiže održiva proizvodnja. Osim toga u ovom radu dokazano je da je potrošnja energije obrnuto proporcionalna brzini procesa, odnosno specifična energija potrošena za snabdijevanje električnom energijom proizvodne opreme opada sa povećanjem brzine procesa. Pored električne energije potrebne za stvarnu obradu materijala, značajan dio električne energije troši periferna oprema, kada je proizvodna oprema uključena. Yan i ostali [8] proučavali su metod optimizacije parametara obrade na osnovu potrošnje energije, efikasnosti obrade i kvaliteta površine pri CNC glodanju. Bi i Wang su razvili model izračunavanja

energije zasnovan na kinematičkim i dinamičkim modelima alatnih mašina [9].

U ovom radu, na osnovu eksperimentalnih rezultata, postavljen je model potrošnje električne energije u zavisnosti od ulaznih parametara (dubine rezanja, koraka i broja obrtaja), pri obradi struganjem na strugu sa CNC upravljanjem.

2 EKSPERIMENTALNE POSTAVKE

Eksperiment je izveden u Laboratoriji Fakulteta za proizvodnju i menadžment Trebinje, na strugu sa numeričkim upravljanjem “EMCO-CONCEPT 250 CNC”, prema Box-Wilsonov-om planu eksperimenta, prikazanom u Tabeli 1, pri obradi struganjem brzoreznog čelika M2, dimenzija Ø10,3 x 60 mm. Kao ulazni parametri procesa rezanja, na dva nivoa su varirani: dubina rezanja a [mm], broj obrtaja n [o/min] i posmak (korak) s [mm/o], a ponavljanje eksperimenta je izvedeno 4 puta u centralnoj tački plana. Struganje je izvedeno alatima (pločicama) od tvrdog metala CCMT 09T304EN-SM.

Tabela 1. Box-Wilson-ov plan eksperimenta

PLAN - MATRICA							
Eks. tačke	Kodirane vrijednosti				Stvarne vrijednosti		
	x_0	x_1	x_2	x_3	a [mm]	n [o/min]	s [mm/o]
1.	+1	-1	-1	-1	0.35	1500	0.10
2.	+1	+1	-1	-1	1.00	1500	0.10
3.	+1	-1	+1	-1	0.35	2000	0.10
4.	+1	+1	+1	-1	1.00	2000	0.10
5.	+1	-1	-1	+1	0.35	1500	0.15
6.	+1	+1	-1	+1	1.00	1500	0.15
7.	+1	-1	+1	+1	0.35	2000	0.15
8.	+1	+1	+1	+1	1.00	2000	0.15
9.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12
10.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12
11.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12
12.	+1	0	0	0	0.60	1750	0.12

Potrošnja električne energije je mjerena za svakih 40 mm obrade, pomoću digitalnog uređaja za mjerenje električne snage u monofaznim i trofaznim sistemima PKT-1660, Slika 1.



Slika 1- Uređaj za mjerenje električne snage u monofaznim i trofaznim sistemima PKT-1660

Digitalni uređaj za mjerenje električne snage u monofaznim i trofaznim sistemima PKT-1660 imaju sposobnost praćenja potrošnje električne energije u toku obradnog procesa. Podaci mjerenja se putem USB konekcije automatski pohranjuju u pratećem softveru. Mjerenje energije pomoću klijesta PKT – 1660 sa akvizicijom podataka prikazano je na slici 2.



Slika 2 - Mjerenje energije i akvizicija podataka

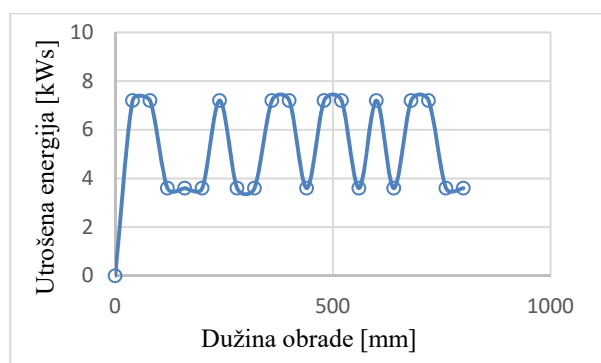
3 REZULTATI

Podaci pohranjeni u pratećem softveru, radi lakše obrade, izvezeni su u softverski paket Microsoft Exel.

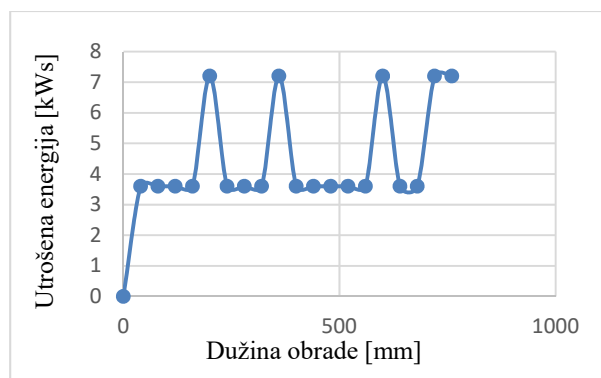
Analiza eksperimentalnih rezultata je pokazala da ulazni tehnološki parametri bitno utiču na potrošnju energije. Najmanja potrošnja energije je pri minimalnoj dubini rezanja (0,35 mm) i maksimalnom broju obrtaja

(2000 o/min) i maksimalnom koraku (0,15 mm/o), dok je maksimalna potrošnja energije pri maksimalnoj dubini rezanja (1 mm), minimalnom broju obrtaja (1500 o/min) i minimalnom koraku (0,1 mm/o).

Na Slici 3 prikazan je grafik potrošnje energije s obzirom na dužinu obrade u eksperimentalnoj tački 1 (minimalni režimi obrade), dok je na Slici 4 prikazan grafik zavisnosti energije u eksperimentalnoj tački 8 (maksimalni režimi obrade).



Slika 3 - Grafik potrošnje energije s obzirom na dužinu obrade u eksperimentalnoj tački 1



Slika 4 - Grafik potrošnje energije s obzirom na dužinu obrade u eksperimentalnoj tački 8

Iz slike 3 i 4 se vidi da je tačnost digitalnog uređaja 0,001 kWh (1 Wh), pa je zbog toga za formiranje matematičkog modela uzeta prosječna potrošnja električne energije u zavisnosti od ulaznih parametara. Prosječna potrošnja energije u eksperimentalnim tačkama prikazana je u Tabeli 2.

Tabela 2. Prosječna potrošnja energije

PLAN - MATRICA														
EKSPER. TAČKE	Kodirane vrijednosti								Stvarne vrijednosti			KOD VRS TE	VEKTOR IZLAZA	
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	a [mm]	n [o/min]	s [mm/o]		Srednja potroš. energije	
														Kodirana vrijednost
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0.35	1500	0.10	-1	E ₁	5,443
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1.00	1500	0.10	a	E ₂	6,24
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0.35	2000	0.10	b	E ₃	4,5
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1.00	2000	0.10	ab	E ₄	4,5
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.35	1500	0.15	c	E ₅	3,96
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1.00	1500	0.15	ac	E ₆	4,56
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0.35	2000	0.15	bc	E ₇	3,6
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1.00	2000	0.15	abc	E ₈	4,547
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E ₉	5,22
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E ₁₀	4,8
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E ₁₁	4,5
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1750	0.12		E ₁₂	5,22
Koeficijent višestruke regresije	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃					Greške: s ² (y) s(b ₀) s(b ₁) s(b ₂) s(b ₃)	
Osnovni nivo		x ₀₁	x ₀₂	x ₀₃										
Interval varijacija		w ₁	w ₂	w ₃										
Gornji nivo		x _{g1}	x _{g2}	x _{g3}										
Donji nivo		x _{d1}	x _{d2}	x _{d3}										

U cilju određivanja prosječne potrošnje energije u svim tačkama eksperimentalnog prostora, odnosno u cilju postavljanja matematičkog modela prosječne

potrošnje energije u zavisnosti od ulaznih parametara, primjenom regresione analize određeni su parametri matematičkog modela, koji su navedeni u Tabeli 3.

Tabela 3. Parametri matematičkog modela

Parametri modela	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
	1,55	0,0639	-0,0769	-0,1056	-0,00552	0,0297	0,0524	0,0286
Studentovi kvantiteti	t _{b₀}	t _{b₁}	t _{b₂}	t _{b₃}	t _{b₁₂}	t _{b₁₃}	t _{b₂₃}	t _{b₁₂₃}
	281,51	11.607	-13,97	-19,17	-1,003	5,402	9,512	5,201
Ocjena signifikantnosti	sign.	sign.	sign.	sign.	nesign.	sign.	sign.	sign.

Ocjena signifikantnosti parametara modela prvog i nepotpunog drugog reda izvedena je primjenom Student-ovog kriterijuma za usvojeni nivo značajnosti q = 0,05 i stepene slobode:

$$f_{b_0} = M - 1 = 11 \text{ i}$$

$$f_{b_i} = N - 1 = 7 \quad (1)$$

za koje su tablične vrijednosti studentovih kvantiteta [10]:

$$t_{b_{0,1-q/2,11}} = 2,2 \text{ i}$$

$$t_{b_{i,1-q/2,7}} = 2,36 \quad (2).$$

Izračunati studentovi kvantiteti i ocjena signifikantnosti parametara modela navedeni su u tabeli 3, iz koje se vidi da su signifikantni svi parametri modela

prvog reda i nepotpunog drugog reda, osim parametra b_{12} .

Na osnovu izračunatih parametara modela može se postaviti empirijski model srednje potrošnje električne energije u obliku:

$$Y = 1.55 + 0.0639x_1 - 0.0769x_2 - 0.1056x_3 \quad (3).$$

Vraćanjem na prvobitne koordinate preko jednačina transformacije:

$$\begin{aligned} x_1 &= 2 \frac{\ln D - \ln D_{max}}{\ln D_{max} - \ln D_{min}} + 1 \\ x_2 &= 2 \frac{\ln n - \ln n_{max}}{\ln n_{max} - \ln n_{min}} + 1 \\ x_3 &= 2 \frac{\ln s - \ln s_{max}}{\ln s_{max} - \ln s_{min}} + 1 \end{aligned} \quad (4)$$

došlo se konkretnog matematičkog modela potrošnje električne energije:

$$E = \frac{90,739a^{0,122}}{n^{0,535}, s^{0,521}} \quad (5).$$

Provjera adekvatnosti modela po Fišer-ovom kriterijumu pokazala je da je model adekvatan jer je:

$$F_r = 1,836 < F_{r_{t(5\%;11;7)}} = 9.$$

Prema tome, postavljeni model adekvatno opisuje srednju potrošnju energije, kao funkciju cilja, u obuhvaćenom višefaktornom prostoru.

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata, došlo se do zaključka da srednja potrošnja energije značajno zavisi od ulaznih tehnološkim parametrima, a posebno od dubinom rezanja. Tako je najmanja prosječna potrošnja električne energije pri minimalnoj dubini rezanja i maksimalnom broju obrtaja i koraku, a najveća, pri maksimalnoj dubini rezanja, a minimalnom broju obrtaja i posmaku.

Postavljeni matematički model adekvatno opisuje prosječnu potrošnju električne energije.

Zahvalnost

Zahvalni smo Ministarstvu za naučnotehnološki razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske koje je sufinansiralo projekat „Unapređenje tehnologije rezanja optimizacijom ulaznih parametara“ i time doprinijelo da se nabavi potrebna mjerna oprema i da se ovo istraživanje izvrši.

6 LITERATURA

- [1] Zhou, L., R, Li, F., Li, F. Y., (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review, Journal of Cleaner Production. ISSN: 0959-6526, pp. 3721-3734.
- [2] Zhao, G., Hou, C., Qiao, J., Cheng, X., (2016). Energy consumption characteristics evaluation method in turning, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8(11).
- [3] Peng, T., Xu, X., Wang, L., (2014). A novel energy demand modelling approach for CNC machining based on function blocks, Journal of Manufacturing Systems, Vol 33(1), pp. 196-208.
- [4] Liu, F., Xie, J. Liu, S., (2015). A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process, Journal of Cleaner Production, 105.
- [5] Diaza, N., Ninomiya, K., Noble, J., Dornfeld, D., (2012). Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, Procedia CIRP 1(1), pp. 518-523.
- [6] Cutting Machine Tool's Energy Consumption Model, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 50(7).
- [7] Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., (2006). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes, 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering, Corpus ID: 7527600.
- [8] Yan, J., Li, L., (2013). Multi-objective optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality, Journal of Cleaner Production., Vol. (52), pp. 462-471.
- [9] Bi, Z., Wang, L., (2012). Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 31(4), pp. 420-428.
- [10] Luković R., Nikolić B., (1996). Primjenjena statistika, 1. dio – mjerenja, Univerzitet Crne Gore, Podgorica.