Изследване на мощността на консумираната електрическа енергия при струговане

Стефан Велчев, Иван Колев, Красимир Иванов, Георги Ненов

Abstract

The paper presents the results from the conducted experimental research of the dependency between the power consumption by turning using a CNC lathe and the spindle speed and the cutting power. Mathematical models of this dependency are obtained for the machine tool and for the spindle system. The minimum of these dependencies is at a rotation speed which depends on the cutting power. The models are then used to determine the dependencies of the machine tool efficiency and of the main drive on the cutting power and the rotation speed of the spindle. They may also be used for determining the working conditions which provide lower energy costs.

Keywords: *Power consumption, cutting force, CNC turning, mathematical models, efficiency*

ВЪВЕДЕНИЕ

Енегроспестяването е актуален проблем на световната икономика, поради което Европейският парламент прие редица документи относно енергоемките продукти за приемане на мерки за намаляване на разхода на енергия.

В Работния план на Директивата за екодизайн [10] е даден списък на 10 приоритетни групи продукти, една от които е групата на металорежещите машини с голям потенциал за енергоспестяване. Тази група е с висока енергийна консумация– по-голяма от 10000 PJ/year (2,78.10^{12} kWh/year). Приета е Директива на Европейския парламент относно посочването на консумацията на енергия и други ресурси на продукти, свързани с енергопотреблението, върху етикети [1]. Това ще наложи металорежещите машини да бъдат оценявани и квалифицирани по енергийна ефективност през следващите години. За сега нито потребителите, нито производителите на металорежещи машини имат ясна представа за изразходваната от тях електрическа енергия при работа. В тази връзка е необходимо провеждането на детайлни изследвания на консумираната енергия, в частност на нейната мощност, от металорежещите машини при различни условия на работа.

Резултати от енергийни опитни изследвания на някои металорежещи машини с ЦПУ, произвеждани у нас, са дадени в [3] [4]. Установено е, че загубите на празен ход са значителни, а коефициентът на полезно действие (к.п.д.), определян по измерената мощност на консумираната енергия на главния електродвигател и полезната мощност на рязане, има твърде малки стойности.

Математичният модел на к.п.д. на вертикална фрезова машина, апроксимиращ зависимостта му от момента на рязане M_c и честотата на въртене на вретеното n има вида [7]:

$$\eta = \exp\left(f(\ln M_c, \ln n\right), \qquad (1)$$

където $f\left(\ln M_c, \ln n\right)$ е полином от втора степен.

Посредством този модел може да се изчислява консумираната електрическа енергия, както е дадено в [7], но моделите имат твърде сложна структура.

Резултати за влиянието на елементите на режима на рязане – скоростта на рязане v_c , подаването f и дълбочината на рязане a_p, и радиуса при върха на инструмента r_ε върху консумираната мощност при струговане на инструментална стомана AISI P-20 на струг с ЦПУ без и с охлаждане и охлаждане с течен азот, са дадени в [6]. Получени са математични модели за мощността на консумираната енергия, апроксимираща зависимостта й от тези фактори, във вид на полиноми от втора степен.

Чрез проведени теоретични и експериментални изследвания на зависимостта на допълнителните загуби на мощност на системата на главен превод на струг с ЦПУ P_{ad} от мощността на рязане P_c, е получен математичен модел [8]:

$$P_{ad} = b_1 P_c + b_2 P_c^2 . \quad (2)$$

Получени са достатъчно точни математични модели чрез използване на данни от експериментални изследвания на зависимостта на мощността на консумираната електрическа енергия от честотата на въртене и мощността на рязане, респективно на к.п.д. на системата на главния превод на стругове с ЦПУ СТ161 и СТ201 [2] и [5].

Целта на работата е да се намерят достатъчно точни и адекватни математични модели на зависимостта на мощността на консумираната електрическа енергия при струговане на струг с ЦПУ от честотата на въртене на вретеното и мощността на рязане, основани на основните й съставляващи: загуби на мощност на празен ход, допълнителни загуби на мощност и мощност на рязане. Такива математични модели за необходими за оценка на енергийната ефективност на машината при различни условия на рязане, за определяне на к.п.д. и за определяне на такива условия на работа, при които се получава минимален разход на енергия.

МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Постановка на задачите

Предвидено е да се изследва мощността на консумираната енергия на входа на машината и мощността на консумираната енергия на входа на системата на главния превод. Приема се към означенията на величините да се добавя индекс k, който в първия случай $k \equiv m$, а във втория - $k \equiv s$.

Мощността на консумираната електрическа енергия се представя във вида:

$$P_{eck} = P_{idk} + P_{adk} + P_c , \; k \in \{m, s\}, \quad (3)$$

където P_{idk} са загубите на мощност на празен ход;

P_{adk} - допълнителните загуби на мощност;

P_c - мощността на рязане.

Трябва да се определят математичните модели на P_{ecm} и P_{ecs}, апроксимиращи зависимостта им от честотата на въртене на вретеното и мощността на рязане. Ако тези модели са известни, могат да се определят к.п.д. на машината η_m и к.п.д. на системата на главния превод:

$$\eta_k = f(P_c, n) = \frac{P_c}{P_{eck}} ; \; k \in \{m, s\} \quad (4)$$

От проведените изследвания на к.п.д. на системата на главния превод на струг СТ161 чрез математичен модел се установи [2], че зависимостта на к.п.д. от честотата на въртене при $P_c = \text{const}$ има максимум, т.е. мощността P_{ecs} има минимум.

Експериментално това може да се докаже, че ако при изследванията се задават определени дискретни стойности на мощността на рязане, определени по формулата:

$$P_c = \frac{F_c . v_c}{6.10^4} , \text{ kW}, \quad (5)$$

където F_c е главната сила на рязане, N.

Следователно са необходими математични модели за главната сила на рязане от елементите на режима на рязане (v_c, f, a_p) за даден обработван материал, инструмент и други условия на рязане. Тези модели в случая трябва да имат голяма

точност, което може да се постигне, като се варира с факторите в тесни граници. Тогава може да се използва математичен модел от вида:

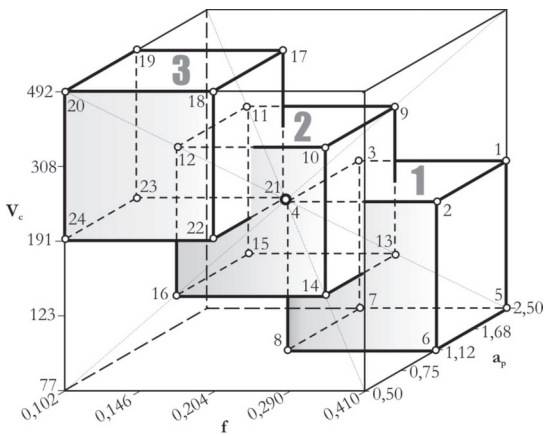
$$F_c = C_{F_c} . a_p^{x_{F_c}} . f^{y_{F_c}} . v_c^{n_{F_c}} . \quad (6)$$

Посредством формули (5) и (6) могат да се изчислят режими на рязане, при които се получава дискретен ред от предварително зададени стойности на мощността на рязане.

Освен за целта на това изследване, моделите от вида (5) и (6) могат да се използват в математичните модели на P_{eck} за изследване влиянието на различни фактори върху консумираната енергия и за нейното оптимизиране.

Методика за изследване на главната сила на рязане

Експерименталните изследвания са проведени при струговане на образци от стомана 40Х с твърдост 200-210 НВ на универсален струг СУ500. Използван е стругарски нож с пластина SCMT120408PM от инструментален материал 4225 и държач SSBCR2525 -12 (Sandvik Coromant). За измерване на силата на рязане е използвана динамометрична уредба от трикомпонентен динамометър D3, индуктивни преобразуватели IWT с чувствителност 45 mV/V.mm от VEB RFT, Германия и универсален измервателен уред №2301 на IEMI. Преди началото на всяка серия динамометричната уредба се еталонира в съответната област на натоварване с помощта на еталонна динамометрична скоба.



Фиг. 1. Планиране на „диагоналния „ експеримент

Съобразно с възможностите на избрания инструмент и обработван материал според справочни материали на Sandvik Coromant се прие вариране на скоростта на рязане в интервала от 70 до 500 m/min, подаването – от 0,1 до 0,4 mm/rev и дълбочина на рязане – от 0,5 до 2,5 mm. За да не се получат нетипични комбинации от елементите на режима или недопустимо голяма мощност на рязане при планиране чрез ПФЕ от типа 2^3, се прие идеята за „диагонални" експерименти [9]. Факторното пространство, определено от посочените интервали на вариране се разделя на три частично застъпващи се области (фиг.1), което представлява модификация на „диагоналния" експеримент, предложен за равнинна факторна област [9]. За всяка област се провежда по една серия експерименти от типа ПФЕ 2^3 с нива на факторите, дадени в табл.1.

Кодираните стойности на факторите v_c, f, a_p се определят по известната формула:

$$Z_j = \frac{\ln X_j - \ln X_{jo}}{0{,}5\left(\ln X_{j\max} - \ln X_{j\min}\right)}, \quad (7)$$

където $X_j \in \{v_c, f, a_p\}$,

X_{jmin} , X_{jmax} , X_{jo} са съответно горно, долно и основно ниво на j -тия фактор.

Нива на вариране на елементите на режима на рязане Табл.1

Нива	I серия			II серия			III серия		
	a_p	f	v_c	a_p	f	v_c	a_p	f	v_c
Долно ниво	1,12	0,204	77	0,75	0,146	123	0,50	0,102	194
Основно ниво	1,68	0,290	123	1,12	0,204	194	0,75	0,146	308
Горно ниво	2,50	0,410	194	1,68	0,290	308	1,12	0,204	492

В табл. 2 е дадена матрицата на планиране на опитите и техните номера за всяка серия. Всички опити са проведени при трикратно повторение. Опитните данни са обработени с компютърна програма „Статистика" за получаване на модела (6).

Матрица на планиране на експеримента Табл.2

Фактори			№ на опита		
X_1	X_2	X_3	I	II	III
+1	+1	+1	1	9	17
-1	+1	+1	2	10	18
+1	-1	+1	3	11	19
-1	-1	+1	4	12	20
+1	+1	-1	5	13	21
-1	+1	-1	6	14	22
+1	-1	-1	7	15	23
-1	-1	-1	8	16	24

Методика на изследванията на мощността на консумираната енергия

Експериментите се проведоха на струг с ЦПУ СТ161 със същия обработван материал и същия стругарски нож, използвани при изследване на силата на рязане. Измервана е мощността на консумираната енергия на входа на машината и на входа на системата на главния превод с помощта на ватметри РМ 1200 на фирмата Schneider с цифрова индикация. Мощността се измерваше при вариране на честотата на въртене на вретеното в интервала от 250 до 2000 min^{-1} при празен ход и при работа.

Мощността на рязане при изследванията варираще от 0,5 до 5,5 kW, с дискретни стойности с разлика $\Delta P_c = 0{,}5$ kW. Посредством математичния модел на силата на рязане (6) и формула (5) са изчислени предварително режими на рязане за получаване на този дискретен ред от мощности на рязане.

За обработването на експерименталните данни се използва методът на най-малките квадрати, а за оценка на моделите коефициентът на детерминация и максималната относителна грешка.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА И АНАЛИЗ

Математичен модел на главната сила на рязане

След обработване на опитните данни от изследванията на главната сила на рязане чрез компютърната програма „Статистика" са получени стойности на коефициента и степенните показатели на математичния модел (6) (табл.3) за трите

Коефициенти и степенни показатели на модели на силата на рязане Табл.3

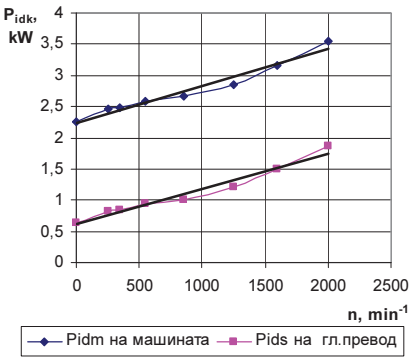
Серия	C_{F_c}	x_{F_c}	y_{F_c}	n_{F_c}	F	F_{kp}	$\lvert\Delta F_{max}\rvert$
I	3406	0,935	0,727	-0,173	6,75	9,12	3,23
II	3097	0,972	0,760	-0,142	4,07	9,12	3,29
III	1825	1,029	0,787	-0,042	0,367	9,12	3,01

серии опити. Моделите са адекватни, оценявани по критерия на Фишер, а максималната относителна грешка на силата на рязане $\Delta F_c = \left| \frac{\hat{F}_c - \bar{F}_c}{\bar{F}_c}, 100\% \right|$ не превишава 3,3 %. Следователно моделът (6) може да служи като еталон за определяне на режими на рязане, при които да се получават зададени мощности на рязане със сравнително голяма точност.

Математични модели на мощността на консумираната електрическа енергия

Експерименталните данни за загубите на мощност на празен ход на машината и на системата на главния превод в зависимост от честотата на въртене на вретеното на струг СТ161 са показани на фиг. 2. Тази зависимост се апроксимира достатъчно точно с линеен модел:

$$P_{idk} = a_{ok} + a_{1k}.n,\ k \in \{m,s\}. \qquad (8)$$



Фиг. 2. Зависимост на P_{idk} от n на машината и на главния превод

В таблица 4 са дадени стойностите на коефициентите a_{ok} и a_{1k} и на коефициенти на детерминация R_k^2 за двата случая. Дадена е измерената мощност P_{ok} на консумираната електрическа енергия от машината и от системата на главния превод при неподвижно вретено $(n = 0)$. Разликата между загубите на мощност на празен ход на машината и на системата на главен превод е почти постоянна $(\Delta P_{id} = P_{idm} - P_{ids} \approx 1{,}65\ kW)$ и представлява загубата на мощност на другите включени системи на машината.

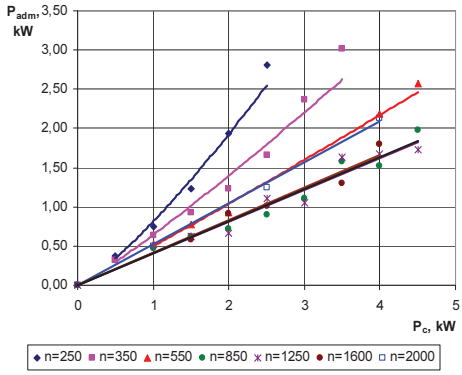
Стойности на коефициентите a_{ok} и a_{1k} Табл.4

k	a_{ok}	a_{1k}	R^2	P_{ok}, kW
$k \equiv m$	2,246	$5{,}89.10^{-4}$	0,9638	2,256
$k \equiv s$	0,622	$5{,}64.10^{-4}$	0,9685	0,638

Допълнителните загуби на мощност се определят по формулата:

$$P_{adk} = P_{eck} - P_{idk} - P_c. \qquad (9)$$

Както беше установено в [2] , тези загуби за струга СТ161 зависят освен от мощността на рязане, така и от честотата на въртене на вретеното (фиг. 3). Оказа се, че в обхвата на регулиране на честотата на въртене на вретеното при постоянен момент (n=250÷850 min^{-1}) те се апроксимират за машината при n=const по-добре чрез модел степенна функция:



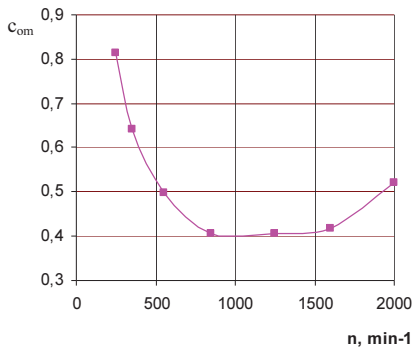
Фиг. 3. Допълнителните загуби на мощност от мощността на рязане при различни честоти на въртене на струга

$$P_{adm} = c_{om}.P_c^{c_{1m}}, \quad (10)$$

където c_{om} е коефициент, зависещ от n;

c_{1m} - степенен показател.

Степенният показател варира в обхвата [250÷550 min^{-1}] от 1,07 до 1,24, като е приета средна стойност 1,15. В обхвата от честоти на въртене, в който регулирането е при постоянна мощност (n= 850÷2000 min^{-1}) $c_{1m} \cong 1$, т.е. моделът (10) е линеен.



Фиг.4. Зависимост на коефициента c_{om} от честотата на въртене на вретеното

За системата на главния превод тази зависимост, както в [2], се апроксимира с линеен модел - $c_{1s} = 1$.

Зависимостта на c_{om} от честотата на въртене е показана графично на фиг. 4. От същия вид е и зависимостта $c_{os} = f(n)$. Както в [2] тези зависимости са апроксимирани посредством композиционен модел от линейна и степенна функция

$$c_{ok} = y_{1k} + y_{2k} = b_{ok} + b_{1k}.n + b_{2k}.n^{b_{3k}} . \quad (11)$$

След обработване на данните от табл.5 по начин, даден в [2] са получени стойностите на коефициентите на модела (11) (табл.6).

Стойности на коефициентите c_{om}, c_{os}, R_m^2 и R_s^2 при различни честоти на въртене Табл.5

n, min^{-1}	250	350	550	850	1250	1600	2000
c_{om}	0,814	0,643	0,498	0,408	0,406	0,416	0,522
R_m^2	0,987	0,982	0,990	0,970	0,957	0,973	0,998
c_{os}	0,981	0,746	0,496	0,415	0,410	0,409	0,522
R_s^2	0,966	0,957	0,931	0,968	0,938	0,900	0,998

Стойности на коефициентите b_{ok}, b_{1k}, b_{2k}, b_{3k}, R_k^2 Табл.6

Коефициент	b_{ok}	b_{1k}	b_{2k}	b_{3k}	R_k^2
Стойност при $k \equiv m$	-1,60	4.10^{-4}	10,76	-0,278	0,998
Стойност при $k \equiv s$	-1,60	4.10^{-4}	13,36	-0,307	0,997

Математичният модел на допълнителните загуби на мощност се получава във вида:

$$P_{adk} = \left(b_{ok} + b_{1k}.n + b_{2k}.n^{b_{3k}}\right).P_c^{c_{1k}}, \; k \in \{m,s\}. \quad (12)$$

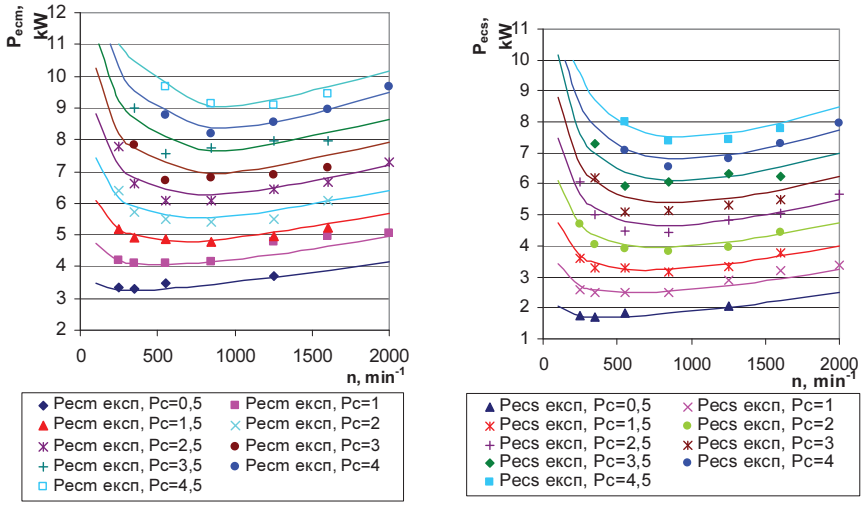
След заместване на математичния модел на P_{idk} (8) и модела (12) за P_{adk} във формула (1), математичният модел за мощността на консумираната електрическа енергия се получава в обобщен вид:

$$P_{eck} = a_{ok} + a_{1k}.n + \left(b_{ok} + b_{1k}.n + b_{2k}.n^{b_{3k}}\right).P_c^{c_{1k}} + P_c, \; k \in \{m,s\}. \quad (13)$$

Максималната относителна грешка между измерените опитни стойности на мощността P_{ecmt} и предсказаните по модела P_{ecm}

$$\Delta P_{ecm} = \frac{P_{ecm} - P_{ecmt}}{P_{ecmt}}.100\% \qquad (14)$$

не превишава $\pm$ 8%. От същия порядък е и относителната грешка ΔP_{ecs}.



а. б.

Фиг.5. Експериментални (точки) и изчислени (линии) стойности на мощността на консумираната електроенергия в зависимост от честотата на въртене при различни мощности на рязане: а - на машината; б – на главния превод

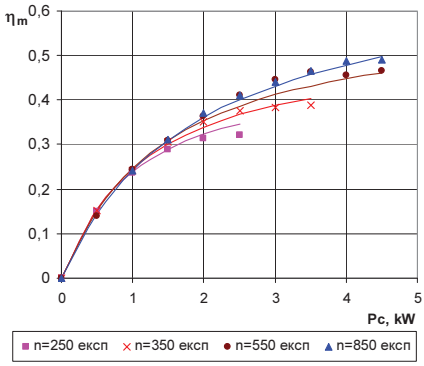
На фиг.5 са показани графично зависимостите на мощността на консумираната електрическа енергия от честотата на въртене на вретеното при различни мощности на рязане според експерименталните данни и изчислените по модела (13). Тези зависимости както за машината, така и за системата на главния превод имат сравнително слабо изразен минимум. Тази оптимална честота на въртене може да се определи теоретично от модела (13). От условието $dP_{eck}/dn = 0$ за оптималната честота на въртене се получава

$$n_{ok} = \left(-\frac{a_{1k}/P_c^{c_{1k}} + b_{1k}}{b_2 . b_3} \right)^{\frac{1}{b_3 - 1}}. \qquad (15)$$

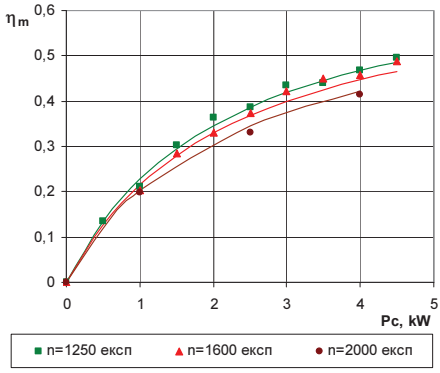
С увеличаване на мощността на рязане оптималната честота на въртене на вретеното се увеличава, както и минималната мощност на консумираната енергия.

По формула (4) са изчислени стойностите на к.п.д. на машината и на системата на главния й превод по експериментални данни и чрез модела на мощността на консумираната енергия. Максималната относителна грешка е същата, като изчислената по форм. (14), Зависимостите на к.п.д. от мощността на рязане при различни честоти на въртене на вретеното са показани графично на фиг. 6. К.п.д. на системата на главния превод е по-голям от тези на машината поради загубите на мощност в другите й системи, достигащи средно $P_s \cong 1{,}65\,\mathrm{kW}$. Например при $P_c = 4{,}5\,\mathrm{kW}$ и при $n = 850\,\mathrm{min}^{-1}$ $\eta_s = 0{,}608$, а $\eta_m = 0{,}492$. Функцията $\eta_s = f(P_c, n)$ има

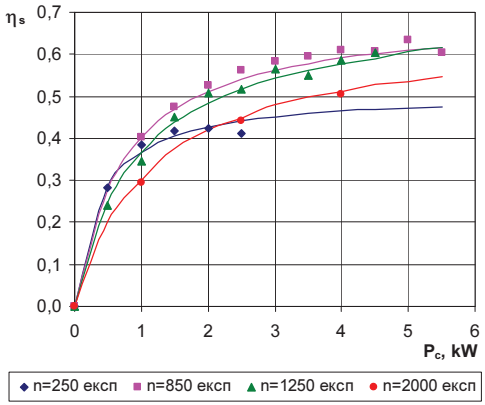
максимум при $P_c = \text{const}$ при оптимални честоти на въртене, определяни по форм. (15).



а



б



в

Фиг. 6. Експериментални (точки) и изчислени (линии) стойности на к.п.д. в зависимост от мощността на рязане при различни честоти на въртене: а,б – на машината; в – на главен превод

ИЗВОДИ

Получени са математични модели на зависимостта на мощността на консумираната електрическа енергия при струговане на струг с ЦПУ СТ161, измервана на входа на машината и на входа на системата на главния й превод, от честотата на въртене на вретеното и мощността на рязане. За да се потвърди експериментално минимума на зависимостта на мощността на консумираната енергия от честотата на въртене на вретеното, експерименталните изследвания са проведени чрез вариране на мощността на рязане с определени дискретни стойности, при работа на режими на рязане, определени чрез предварително

получени математични модели за главната сила на рязане. От експерименталните и числените изследвания този минимум се потвърждава и се получава при оптимална честота на въртене, зависеща от мощността на рязане.

Получените математични модели за мощността на консумираната енергия са използвани за определяне на зависимостите на к.п.д. на машината и на системата на главния превод от мощността на рязане при различни честоти на въртене на вретеното. Тези модели могат да се използват за оценка на енергийната ефективност на машините, за определяне на оптимални по отношение на консумиране електрическа енергия режими на рязане и мощност на електродвигателите на главните преводи на стругове.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Директива 2010/30/ЕС на Европейския парламент и на съвета от 19 май, 2010 г. Официален вестник на Европейския съюз, 18.06.2010 г., L153/1.

[2]. Велчев, С, Колев, И., Иванов К. Модели на коефициента на полезно действие на системата главен превод на стругове с ЦПУ. // Науч. тр. на РУ «Ангел Кънчев» , Русе, т. 50, серия 2, 2011, 104 -111.

[3]. Енчев, П. Енергетични изследвания на металорежещи машини с автоматична скоростна кутия. //Науч. тр. на ВТУ "А. Кънчев", Русе, т. XXVII, серия 2, 1985, 14 -18.

[4]. Енчев, П. Енергетични изследвания на металорежещи машини. //Науч. тр. на ВТУ "А. Кънчев", 1994, т. XXXV, серия 1, 48 – 52.

[5]. Колев, И., Иванов, К., Ненов, Г. Гечевски, С. Изследване коефициента на полезно действие на системата на главния превод на стругове с ЦПУ. // Науч. тр. на РУ «Ангел Кънчев» , Русе, т. 50, серия 2, 2011, 94-98.

[6]. Aggarwal, A., H, Singh., P, Kumar., M, Singh. Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's techigue – A comparative analysis. J. Mat Proces. Technol., vol.200, iss 1-3, 2008, 373 – 384.

[7]. Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. J. Mater. Process. Techol., 2003, №141, 9 –15.

[8]. Hu, S., Liu, F., He, Y., Peng, B. Characteristics of Additional Load Losses of Spindle System of Machine Tools. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 4, № 7, 2010, 1221-1233.

[9]. Lorenz, G. A contribution to the standardization of drill performance test. CIRP Annals, 26, №1, 1977, 39 - 43.

[10]. Working Plan of the Ecodesign Directive (2009 – 2011). Version 28 April 2008http://www.eup- network.de/fileadmin/user_upload/ Produktgruppen/ Arbeitsplan/DraftWorkingPlan_28Apr08.pdf.

За контакти:

Проф. д-р инж. Стефан Велчев, тел.: 082-888 487, e-mail: svelchev@uni-ruse.bg,

проф. д-р инж. Иван Колев, Катедра "Технология на машиностроенето и металорежещи машини", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 544, e-mail: kolev@uni-ruse.bg, гл. ас д-р инж. Красимир Иванов, Катедра "Технология на машиностроенето и металорежещи машини", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 451, e-mail: kivanov@uni-ruse.bg, доц. д-р инж. Георги Ненов, Катедра "Технология на машиностроенето и металорежещи машини", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 679, e-mail: gnenov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран