

Модели на коефициента на полезно действие на системата главен превод на стругове с ЦПУ

Стефан Велчев, Иван Колев, Красимир Иванов

Abstract: Proposed are two types of mathematical models with sufficient accuracy for approximation of the experimental dependency of the efficiency of the spindle systems of CNC lathes ST161 and ST201 on the power of cut and the rotating speed. The obtained models allow assessment of the energy efficiency of the lathes and determination of the working conditions under which the electricity consumption is minimal.

Key words: efficiency of spindle system, CNC lathe, mathematical models

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Непрекъснатото нарастване на потреблението на енергия в световната икономика и непредоставянето в същата степен и условия на нови източници на енергия, води до рязкото увеличаване на цените на енергията в последните десетилетия. Освен това от повишеното производство и потребление на енергия се увеличава замърсяването на околната среда и могат да се предизвикат евентуално климатични промени, което може да доведе до значителни допълнителни разходи в бъдеще. Поради тези причини Европейският парламент прие следните документи:

- Директива 2005/32/ЕО за създаване на рамка за определяне на изискванията за екодизайн на енергоемките продукти [4].
- Работен план на Директивата за екодизайн, в който е включен списък на 10 приоритетни групи продукти, една от които е и групата на металорежещите машини, за приемането на мерки за енергоспестяване [9].
- Директива 2009/25/ЕС за създаване на рамка за определяне изискванията за екодизайна на енергопотребяващите продукти [5].

Въпреки дискусията относно необходимостта за оценка на енергопотреблението на металорежещите машини [8], много е вероятно те да бъдат оценявани и класифицирани по отношение на енергийна ефективност в следващите години. За сега нито потребителите, нито производителите на металорежещи машини имат ясна представа за изразходваната от тях електрическа енергия при работа.

Основен показател за оценка на енергийната ефективност на дадена металорежеща машина е нейният коефициент на полезно действие (к.п.д.), в частност к.п.д. на системата главен превод, като най-голям консуматор на енергия в сравнение с другите системи на машината. В специалната литература у нас и в чужбина се намират твърде малко сведения за к.п.д. на металорежещите машини. Резултати от енергийни изследвания на някои металорежещи машини с ЦПУ, произведени у нас, са дадени в [1] [2]. Установено е, че загубите на мощност на празен ход са значителни, к.п.д. на главния превод има твърде ниска стойност и пълната мощност на електродвигателя не може да се използва поради вибрации и нестабилна работа.

Математичен модел на к.п.д. η на системата главен превод на фрезова машина, апроксимиращ зависимостта му от момента на рязане M_c и честотата на въртене на вретеното n , получен след обработване на опитни данни, е даден в [6]. Той има вида

$$\eta = \exp(f(\ln M_c, \ln n)), \quad (1)$$

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

Проведени са и подробни изследвания на допълнителните загуби на мощност в системата главен превод на струг [7]. Теоретично е доказано и експериментално

потвърдено, че допълнителните загуби на мощност на системата главен превод P_{ad} на изследвания струг зависят от мощността на рязане P_c . Тази зависимост се изразява чрез математичния модел:

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

Целта на работата е да се намерят достатъчно точни математични модели на зависимостта на к.п.д. на системата главен превод на някои стругове с ЦПУ от мощността на рязане и честотата на въртене на вретеното, като се използват данни от експериментални изследвания. Апроксимирането на тази зависимост чрез математичен модел е необходимо освен за оценка на енергийната ефективност при различни условия на работа, но и за определяне на такива условия и мощност на електродвигателя, при който се получава минимален разход на електроенергия.

2. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

К.п.д. на системата главен превод се определя по формулата:

$$\eta = \frac{P_c}{P_{ec}} = f(P_c, n), \quad (3)$$

където P_{ec} е мощност на консумирана електрическа енергия на входа на системата.

Тази мощност е прието да се представя по следния начин:

$$P_{ec} = P_{id} + P_{ad} + P_c, \quad (4)$$

където P_{id} са загубите на мощност на празен ход на системата.

За определяне на математичните модели на зависимостта (3) се използват данните за P_{ec} , P_{id} , P_c и η , получени от експерименталните изследвания по методика, дадена в [3]. Тези изследвания са проведени на стругове с ЦПУ СТ161 и СТ201, които имат различна кинематична структура на механичната част на системата главен превод. Стругът СТ161 е с проста кинематична структура: електродвигател – ремъчна предавка – вретенен възел. Кинематичната структура на струга СТ201 е по-сложна: ремъчна предавка – двустепенна скоростна кутия – ремъчна предавка – вретенен възел.

За определяне на математичния модел на зависимостта (3) са използвани два подхода:

а) Чрез определяне на математичните модели на P_{id} и P_{ad} (математичен модел от първи тип), т.е.

$$\eta = \frac{P_c}{P_{id} + P_{ad} + P_c} \quad (5)$$

б) Чрез непосредствено използване на опитните данни за к.п.д. (математичен модел от втори тип).

Във втория случай трябва да се приеме математичен модел със структура, отговаряща на определени гранични условия:

- При $P_c = 0$ и $n = 0$, трябва $\eta = 0$;
- При увеличаване на мощността на рязане к.п.д. се увеличава, но клони към някаква максимална, съобразена с получените данни стойност, $\eta \rightarrow \eta_{max}$.

Един от възможните такива модели има вида:

$$\eta = \eta_{max} - \frac{\eta_{max}}{d_0 P_c^{b_1} + 1}. \quad (6)$$

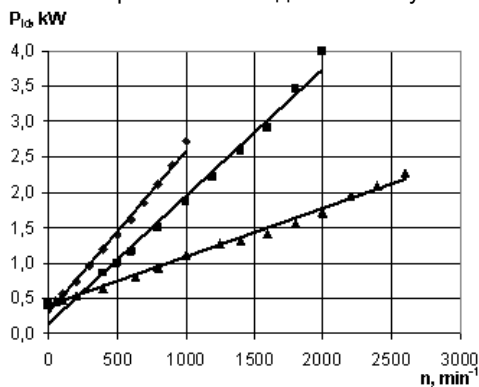
За обработването на експерименталните данни се използва методът на най-малките квадрати чрез компютърна програма, а за оценката моделите – коефициентът на детерминация R^2 и максималната относителна грешка

$$\Delta\eta_{\max} = \frac{\eta_{\text{mod}} - \eta_{\text{exp}}}{\eta_{\text{exp}}}, 100\%.$$

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА И АНАЛИЗ

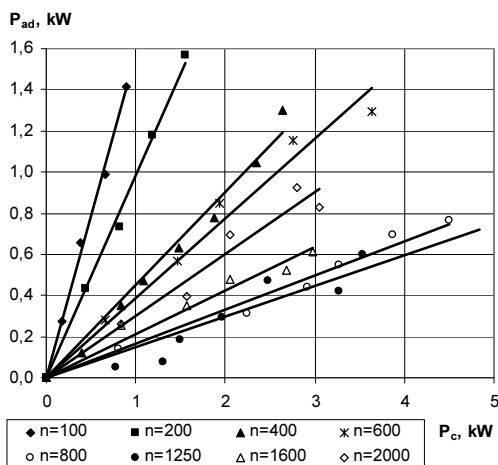
3.1. Математичен модел на к.п.д. от първи тип

Експерименталните данни за загубите на мощност на празен ход в зависимост



Фиг. 1. Зависимости на P_{id} от n на СТ161 и СТ201: \blacktriangle - СТ161; \blacklozenge - СТ201 – I подобхват; \blacksquare - СТ201 – II подобхват

Различните загуби на мощност на празен ход на I и II подобхвати могат да се обяснят с различните к.п.д. на двете зъбни предавки на скоростната кутия, зависещи от броя на



Фиг. 2. Допълнителните загуби на мощност в зависимост от мощността на рязане при различни честоти на въртене на струг СТ161

от честотата на въртене на вретеното за стругове СТ161 и СТ201 (I и II подобхвати на честотите на въртене) са показани на фиг.1. Тези зависимости се апроксимират достатъчно точно с линеен модел:

$$P_{id} = a_0 + a_1 n. \quad (7)$$

В табл.1 са дадени стойностите на a_0 , a_1 и R^2 за двата струга.

Поради по-късата кинематична верига на главния превод на струг СТ161, загубите на мощност на празен ход са значително по-малки от тези на струг СТ201. Коефициентът a_0 е в същност загуба на мощност в електрическата част на системата при невключен електродвигател.

Таблица 1

Струг	a_0	a_1	R^2
СТ161	0,388	0,0007	0,993
СТ201	I	0,307	0,023
	II	0,149	0,018

зъбите на колелата.

Допълнителните загуби на мощност се определят по формулата:

$$P_{ad} = P_{ec} - P_{id} - P_c.$$

Оказва се, че за струга СТ161 те зависят освен от мощността на рязане, но и от честотата на въртене на вретеното (фиг.2). При $n = \text{const}$ те се апроксимират с линеен модел.

$$P_{ad} = c_0 \cdot P_c, \quad (9)$$

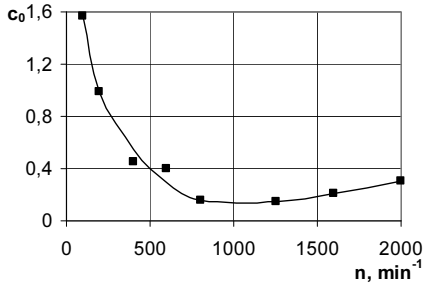
където c_0 е коефициент, зависещ от честотата на въртене (табл.2).

Зависимостта на коефициента c_0 от честотата на въртене е показана на фиг.3. Чрез известните

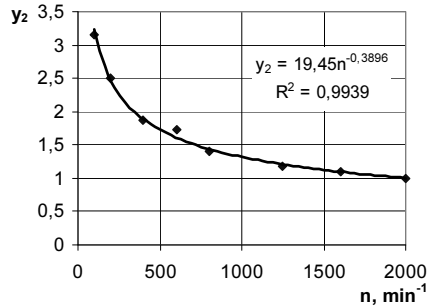
компютърни програми тази зависимост не е възможно да бъде изразена чрез подходящ математичен модел. Предлага се композиционен модел от линейна и степенна функция:

$$c_0 = y_1 + y_2, \quad (10)$$

където $y_1 = b_0 + b_1 n$, $y_2 = b_2 n^{b_3}$.



Фиг. 3. Зависимост на коефициента c_0 от честотата на въртене на вретеното на струг СТ161



Фиг. 4. Апроксимация на функцията $y_2 = f(n)$ на струг СТ161

Чрез вариране на коефициентите на линейната функция се определя $y_2 = c_0 - y_1$ и при подходящи стойности на b_0 и b_1 , функцията y_2 се апроксимира като степенна (фиг. 4).

Стойности на c_0 и R^2

Таблица 2

n, min^{-1}	100	200	400	600	800	1250	1600	2000
c_0	1,564	0,988	0,452	0,400	0,160	0,150	0,212	0,301
R^2	0,994	0,995	0,983	0,982	0,917	0,895	0,957	0,960

Окончателно за допълнителните загуби на мощност се получава математичният модел:

$$P_{ad} = (b_0 + b_1 n + b_2 n^{b_3}) P_c. \quad (11)$$

Стойностите на коефициентите му са дадени в табл. 3.

Стойности на b_0, b_1, b_2, b_3 и R^2

Таблица 3

Коефициент	b_0	b_1	b_2	b_3	R^2
Стойност	-1,60	$4,5 \cdot 10^{-4}$	19,45	-0,39	0,994

След заместване на математичния модел за P_{id} (7) и модела P_{ad} (11) във формула (5), математичният

модел за к.п.д. за системата главен превод на струг СТ161 се получава във вида:

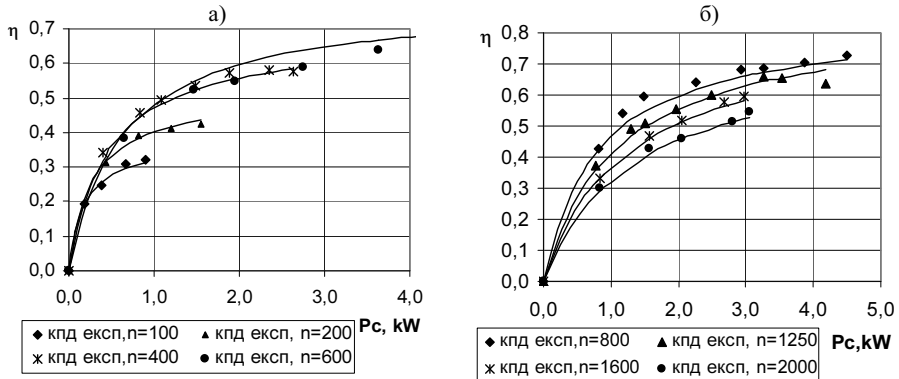
$$\eta = \frac{P_c}{a_0 + a_1 n + (b_0 + b_1 n + b_2 n^{b_3}) P_c + P_c}. \quad (12)$$

На фиг.5 е показана графично зависимостта $\eta = f(P_c, n)$ според модела (12) е $\Delta\eta_{\max} = \pm 8\%$.

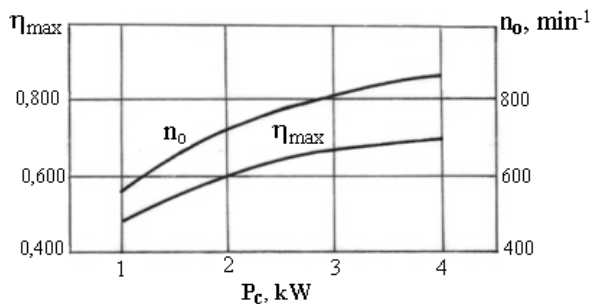
Функцията $\eta = f(P_c, n)$ има максимум при $P_c = \text{const}$. От условието $d\eta/dn = 0$ за оптималната честота на въртене се получава

$$n_0 = \left(-\frac{a_1/P_c + b_1}{b_2 b_3} \right)^{\frac{1}{b_3-1}}. \quad (13)$$

Оптималната честота на въртене се увеличава, както и максималната стойност на к.п.д. η_{max} , с увеличаване на мощността на рязане (фиг.6).



Фиг. 5. Експериментални (точки) и изчислени (линии) стойности на к.п.д. в зависимост от мощността на рязане и честотата на въртене на струг СТ161: а) $n = 100 \div 600 \text{ min}^{-1}$; б) $n = 800 \div 2000 \text{ min}^{-1}$



Фиг. 6. Оптимална честота на въртене и максимален к.п.д. в зависимост от мощността на рязане

Математичният модел за к.п.д. от първи тип за струга СТ201 не се оказва удачен. Закономерност на влиянието на честотата на въртене върху допълнителните загуби на мощност не се наблюдава, а при използване на модел от вида (2) се получава голямо разсейване.

3. 2. Математичен модел на к.п.д. от втори тип

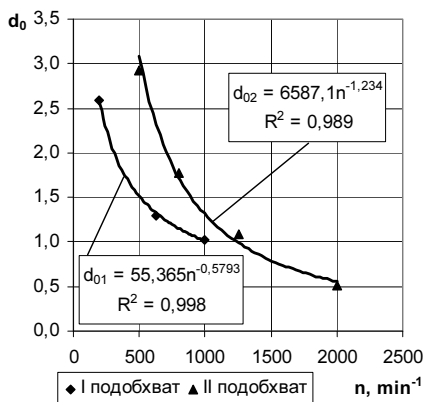
В този случай трябва да се определи степенната функция

$$y = d_0 P_c^{b_1} \quad (14)$$

при различни честоти на въртене на вретеното. След преобразуване на модела (6) се получава:

$$y = \frac{\eta}{\eta_{\max} - \eta} = f(P_c) = d_0 P_c^{b_1} . \quad (15)$$

Добра апроксимация на тази функция се получава като се приеме стойност на η_{\max} с около 10 ÷ 15 % по-голяма от най-голямата опитно установена стойност. Стойностите на y се изчисляват според опитните стойности на η при различни



Фиг. 7. Зависимости на коефициента d_0 от честотата на въртене на вретеното за I и II подобхвата на струг СТ201

Стойности на η_{\max} , b_0 , b_1 , b_2 и R^2 Таблица 4

Обхват	η_{\max}	b_0	b_1	b_2	R^2
I	0,55	55,37	1,07	-0,58	0,994
II	0,50	6578	1,42	-1,23	0,989

R^2 за I и II подобхвата са дадени в табл.4.

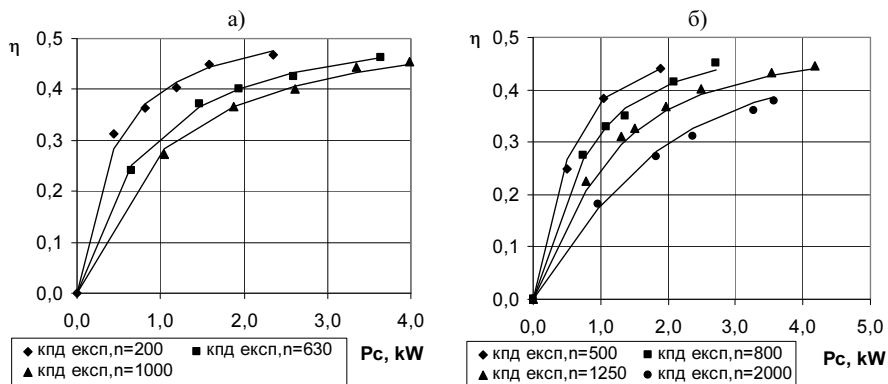
На фиг. 8 е показано графично влиянието на мощността на рязане и честотата на авъртене на вретеното според модела (16) с линии и опитните данни, означени с точки. Максималната относителна грешка на модела (16) е $\Delta\eta_{\max} = \pm 5\%$.

стойности на P_c и честоти на въртене от I и II подобхвата. След математично обработване на данните се оказва, че за I подобхват стойностите на b_1 варират в тесни граници при различни честоти на въртене ($b_1 = 0,92 \div 1,19$, $R^2 = 0,975 \div 0,994$) и следователно може да приеме средна стойност $b_1 = 1,07$, а за II подобхват - $b_1 = 1,28 \div 1,51$, $R^2 = 0,974 \div 0,998$ със средна стойност $b_1 = 1,42$. Зависимостите на коефициента d_0 от честотата на въртене и апроксимиращите ги степенни функции $d_0 = b_0 n^{b_2}$ и коефициента R^2 с показани на фиг.7.

Математичният модел на к.п.д. от втори тип за струг СТ201 окончателно се получава във вида:

$$\eta = \eta_{\max} \frac{\eta_{\max}}{b_0 P_c^{b_1} \cdot n^{b_2} + 1} . \quad (16)$$

Стойностите на η_{\max} , b_0 , b_1 , b_2 и



Фиг. 8. Експериментални (точки) и изчислени (линии) стойности на к.п.д. в зависимост от мощността на рязане и честотата на въртене на струг СТ201: а) I подобхват; б) II подобхват

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимост от кинематичната структура на механичната част на системата главен превод се оказва, че зависимостта на к.п.д. от мощността на рязане и честотата на въртене се апроксимира с различни като структура математически модели. За струг СТ161 с механична част без скоростна кутия подходящ е модел от първи тип (12), а със скоростна кутия – (струг СТ201) – от втори тип (16). Получени са математически модели на к.п.д. на системата главен превод на струговете СТ161 и СТ201, които апроксимират опитните данни с достатъчно висока точност и висока стойност на коефициента на детерминация. Установено е, че чрез модела от първи тип на струг СТ161, могат да се определят оптимални стойности на честотата на въртене в зависимост от мощността на рязане, при които к.п.д. има максимални стойности и следователно консумираната мощност е минимална. Приложената методика за определяне на математичните модели на к.п.д. може да се прилага и за други модели стругове с ЦПУ. Получените математически модели на к.п.д. на системата главен превод на стругове могат да се използват за оценка на енергийната ефективност на машините, за определяне на оптимални по отношение на консумираната електроенергия режими на рязане и за определяне на оптимална мощност на електродвигателите на главните преводи на стругове.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. 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.
- [2]. Енчев, П. Енергетични изследвания на металорежещи машини. //Науч. тр. на ВТУ "А. Кънчев", 1994, т. XXXV, серия 1, 48 – 52.
- [3]. Колев, И., Иванов, К., Ненов, Г., Гечевски, С. Изследване коефициента на полезно действие на системата на главния превод на стругове с ЦПУ. В настоящият сборник.
- [4]. Directive 2005/32/EC of the European Parliament and the Council. Official Journal of the European Union, 22.07.2005, L 191/29.
- [5]. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and the Council. Official Journal of the European Union, 31.10.2009, L 285/10.

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

[7]. 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.

[8]. Sabastian, M. Kommt das Energy Label für die Werkzeugmaschine? Production, 2008, № 12.

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

За контакти:

Проф. д-р инж. Стефан Димитров Велчев, svelchev@uni-ruse.bg

Доц. д-р инж. Иван КОЛЕВ Иванов, РУ “Ангел Кънчев”, Тел.: (082) 888 544,
E-mail: kolev@uni-ruse.bg

Гл. ас. д-р инж. Красимир Атанасов Иванов, РУ “Ангел Кънчев”, Тел.: (082) 888 451, E-mail: kivanov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран