

УДК 621.9.014.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ

Е.И. Махаринский

Аналитически, на базе известных эмпирических моделей получены формулы для определения оптимальной частоты вращения при точении с переменной скоростью резания (конических, торцовых и ступенчатых поверхностей).

Такая обработка довольно распространена и имеет место при подрезании торца и точении конуса или ступенчатой поверхности.

Процесс изнашивания резца при постоянной скорости резания V отражается известной моделью [1]

$$h = C \cdot V^\beta \cdot t^\lambda, \quad (1)$$

где h – накопленный за время t износ по задней грани, C, β и λ – эмпирические параметры модели.

В случае торцового точения с постоянной подачей s и глубиной a при постоянной частоте вращения n скорость резания V изменяется согласно следующим моделям (в зависимости от направления подачи):

$$V = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{1000} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot s \cdot n}{d_2} \cdot t\right) \quad \text{или} \quad V = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{1000} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot s \cdot n}{d_1} \cdot t\right), \quad (2)$$

где $d_1 = d_{\min}$, $d_2 = d_{\max}$, t – время.

За бесконечно малый промежуток времени dt этим изменением можно пренебречь. Тогда для произвольной скорости резания V , дифференцируя модель 1, получим мгновенную скорость изнашивания:

$$\frac{dh}{dt} = \lambda \cdot C \cdot V^\beta \cdot t^{\lambda-1}. \quad (3)$$

Подставив в эту модель значение t согласно модели 1 и значение V согласно моделям 2, получим (для точения к центру)

$$h^{\gamma-1} \cdot dh = \lambda \cdot W_1 \cdot (1 - B_1 \cdot t)^{\beta \cdot \gamma} \cdot dt, \quad (4)$$

где $\gamma = 1/\lambda$, $W_1 = C^\gamma \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{1000}\right)^{\beta \cdot \gamma}$, $B_1 = \frac{2 \cdot s \cdot n}{d_2}$.

Проинтегрировав уравнения 4, получим

$$h^\gamma = \frac{W_1}{B_1 \cdot (\beta \cdot \gamma + 1)} \cdot \left[1 - (1 - B_1 \cdot t)^{(\beta \cdot \gamma + 1)}\right]. \quad (5)$$

Подставив значение t , равное основному времени обработки одной детали, $t_o = (d_2 - d_1)/(2 \cdot s \cdot n)$, получим накопленный за время обработки одной детали износ:

$$h_1^\gamma = \frac{\lambda \cdot C^\gamma}{\beta + \lambda} \cdot \frac{d_2}{2 \cdot s} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_2}{1000}\right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(\beta \cdot \gamma + 1)}\right] \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)} = K_1 \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (6)$$

Интегрируя уравнения 3 для i -ой обработанной детали, получим

$$h_i^\gamma - h_{(i-1)}^\gamma = K_1 \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (7)$$

Предположим, что после обработки M деталей накопленный износ достигнет предельно допустимого значения $h_{\text{дон}}$. Тогда, складывая для значений i от 0 до M правые и левые части уравнений 7, получим

$$h_{\text{дон}}^\gamma = M \cdot K_1 \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}, \quad (8)$$

Стойкость резца $T = M \cdot t_o$. Откуда $M = T / t_o$. Подставив это значение M в модель 8, получим

$$\frac{t_o}{T} = \frac{K_1}{h_{\text{дон}}^\gamma} \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)}. \quad (9)$$

Информация о значениях параметров C и β очень ограничена. Чтобы можно было пользоваться традиционной справочной информацией [2], сравним модели для определения стойкости при постоянной скорости резания.

$$T = \left(\frac{h_{\text{дон}}}{C} \right)^\gamma \cdot \frac{1}{V^{\beta \cdot \gamma}} \quad \text{и} \quad T = \left(\frac{C_V}{a^x \cdot s^y} \right)^\mu \cdot \frac{1}{V^\mu}.$$

Откуда следует, что

$$\left(\frac{h_{\text{дон}}}{C} \right)^\gamma = \left(\frac{C_V}{a^x \cdot s^y} \right)^\mu, \quad \text{и} \quad \beta \cdot \gamma = \mu. \quad (10)$$

Значения C_V, x, y и $\mu = 1/m$ есть в справочнике [1].

Критерием оптимизации обычно принимают приведенные затраты $ПЗ$ на изготовление одной детали:

$$ПЗ = E \cdot [t_o + (t_{cu} + 3_u / E) \cdot (t_o / T)], \quad (11)$$

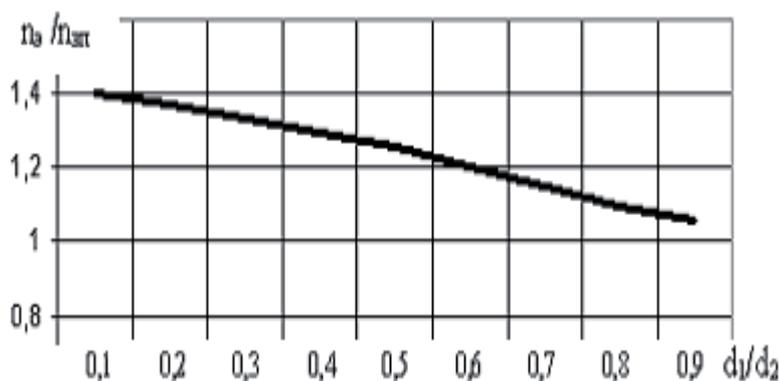
где E – затраты на минуту эксплуатации рабочего места; t_{cu} – время на смену затупившегося инструмента; 3_u – затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости. Подставив в модель 11 значения t_o и t_o / T , получим

$$ПЗ = E \cdot \left[\frac{d_2 - d_1}{2 \cdot s \cdot n} + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \cdot \frac{K_1}{h_{\text{дон}}^\gamma} \cdot n^{(\mu - 1)} \right]. \quad (12)$$

Для определения экономической частоты вращения приравняем нулю производную от $ПЗ$ по n и подставим значения K_1 из модели 6. Тогда

$$n_3 = \frac{1000}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{C_V}{T_3^m \cdot a^x \cdot s^y} \cdot \left[(\mu + 1) \cdot \frac{1 - d_1 / d_2}{1 - (d_1 / d_2)^{(\mu + 1)}} \right]^m, \quad (13)$$

где $T_3 = (\mu - 1) \cdot (t_{cu} + 3_u / E)$.



Если определять экономическую частоту вращения $n_{эн}$, как это принято для максимального диаметра, и не учитывать переменность скорости резания, то

$$n_{эн} = \frac{1000}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{C_V}{T_3^m \cdot a^x \cdot s^y}.$$

Зависимость отношения $n_3 / n_{эн}$ от (d_1 / d_2) при $m = 0,2$ показана на рисунке и может быть аппроксимирована следующей моделью:

$$n_3 / n_{эн} = 1,45 - 0,45 \cdot (d_1 / d_2). \quad (14)$$

Аналитически доказано, что в случае точения торца от центра и конусной поверхности экономическую частоту вращения также можно определять согласно моделям 13 и 14.

В случае точения ступенчатой поверхности при постоянной частоте вращения n с постоянной подачей s и глубиной a скорость резания изменяется ступенчато от V_{\min} до V_{\max} . Тогда при обработке i -й ступени накопленный износ можно определить (в соответствии с выражением 1) из следующей модели:

$$h_i^\gamma - h_{(i-1)}^\gamma = C^\gamma \cdot V_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot t_i. \quad (15)$$

Тогда при обработке одной детали с k ступенями накопленный износ определяется из выражения 16, которое получено последовательным сложением правой и левой частей модели 15 для всех ступеней.

$$h_{од}^\gamma = C^\gamma \cdot \left(\frac{\pi}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot L_i}{s}. \quad (16)$$

При обработке за период стойкости N деталей накопленный (допустимый) износ определяется моделью

$$h_{дон}^\gamma = N \cdot C^\gamma \cdot \left(\frac{\pi}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot n^{(\beta \cdot \gamma - 1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot L_i}{s}, \quad (17)$$

где $N = T / t_o$. Тогда обозначив

$$K_3 = \left(\frac{\pi}{1000} \right)^{\beta \cdot \gamma} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^{\beta \cdot \gamma} \cdot L_i}{s} = \left(\frac{\pi}{1000} \right)^\mu \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^\mu \cdot L_i}{s},$$

где d_i и L_i – диаметр и длина i -й ступени, с учетом модели 10 можем записать

$$\frac{t_o}{T} = \left(\frac{a^x \cdot s^y}{C_V} \right)^\mu \cdot K_3 \cdot n^{(\mu-1)}. \quad (18)$$

Подставив в модель 15 значение t_o и t_o/T из модели 18, получим

$$ПЗ = E \cdot \left[\frac{L}{s \cdot n} + \left(t_{cu} + \frac{3_u}{E} \right) \cdot \frac{K_3}{B^\mu} \cdot n^{(\mu-1)} \right], \quad (19)$$

где $B = C_V / (a^x \cdot s^y)$, $K_3 = \left(\frac{\pi}{1000} \right)^\mu \cdot \sum_{i=1}^k \frac{d_i^\mu \cdot L_i}{s}$, L – длина обрабатываемой части детали. Приравняв производную от приведенных затрат по n нулю и обозначив $d_i / d_{\max} = \eta_i$, $L_i / L = \lambda_i$, получим выражение для определения эффективной частоты вращения n_\circ :

$$n_\circ = \frac{1000}{\pi \cdot d_{\max}} \cdot \frac{C_V}{T_\circ^m \cdot a^x \cdot s^y} \cdot \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^k \eta_i^\mu \cdot \lambda_i \right)^m}. \quad (20)$$

Обозначив $n_{\circ n}$ оптимальную частоту вращения, которая определена традиционным методом (по d_{\max} без учета ступенчатости), получим выражение для оценки эффективности по основному времени δ %:

$$\delta = 100 \cdot \left(\frac{n_\circ}{n_{\circ n}} - 1 \right) = 100 \cdot \left[1 / \left(\sum_{i=1}^k \eta_i^\mu \cdot \lambda_i \right)^m - 1 \right]. \quad (27)$$

Расчеты показали, что при обработке ступенчатого вала с указанными в таблице характеристиками

i	1	2	3	4
λ	0,1	0,25	0,35	0,3
η	1	0,8	0,75	0,6

выигрыш в производительности по сравнению с традиционным методом оптимизации составляет 29,8%, что довольно существенно.

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые предлагаются математические модели (18 и 26) для определения оптимальной частоты вращения шпинделя в случае точения с переменной скоростью резания на токарно-карусельных и токарно-копировальных станках. Применение этих моделей для массового производства дает довольно ощутимый прирост производительности, зависящий от отношения диаметров элементов детали.

Список использованных источников

1. Ящерицын П. И. Планирование экспериментов в машиностроении: справочник / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 283 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.2 /под редакцией А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

SUMMARY

For the first time mathematical models for definition of optimum frequency of rotation of a spindle in a case turning with variable speed of cutting on turning mill and copy lathe machine tools are offered. Application of these models for mass production gives enough appreciable gain of productivity dependent on the attitude of diameters of elements of a detail.

УДК 621.9.014.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

Е.И. Махаринский, Л.Н. Соколова

Аналитически, на базе известных эмпирических моделей получены формулы для определения оптимальной скорости резания с учетом затрат на технологическую электроэнергию.

1. Критерии оптимизации

В общем случае в качестве критериев качества технологических систем механической обработки могут быть приняты: 1) интенсивность обработки; 2) цикловая производительность; 3) приведенные затраты на операцию; 4) удельная стоимость съема металла; 5) удельная энергоемкость.

Обычно при оптимизации показателей режима резания применяется третий, который учитывает затраты денег на операцию, зависящие от режима резания. Однако затраты электроэнергии на операцию также зависят от режима резания. Поскольку экономия электроэнергии в настоящих условиях является актуальной задачей, то предлагается в качестве критерия оптимизации принимать комплексный показатель, учитывающий также затраты на электроэнергию. Тогда функция цели (затрат $ПЗ$) будет иметь вид

$$ПЗ = E \cdot \left[t_o + \left(t_{cu} + \frac{Z_u}{E} \right) \cdot t_o / T \right] + E_1 \cdot N_p \cdot t_o, \quad (1)$$

где: E – минутные затраты на эксплуатацию рабочего места, руб/мин;

t_o – основное время, мин., t_{cu} – время смены затупившегося инструмента, мин., Z_u – затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости, руб., T – стойкость инструмента, мин., E_1 – стоимость киловатт-минуты, руб/кВт мин., N_p – мощность резания, кВт, которая по-разному (для разных материалов) зависит от скорости.

2. Синтез целевой функции

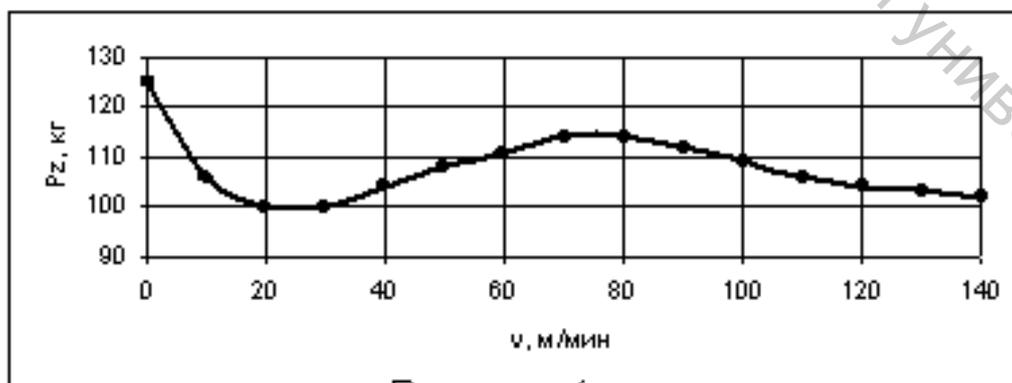


Рисунок 1