

## 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

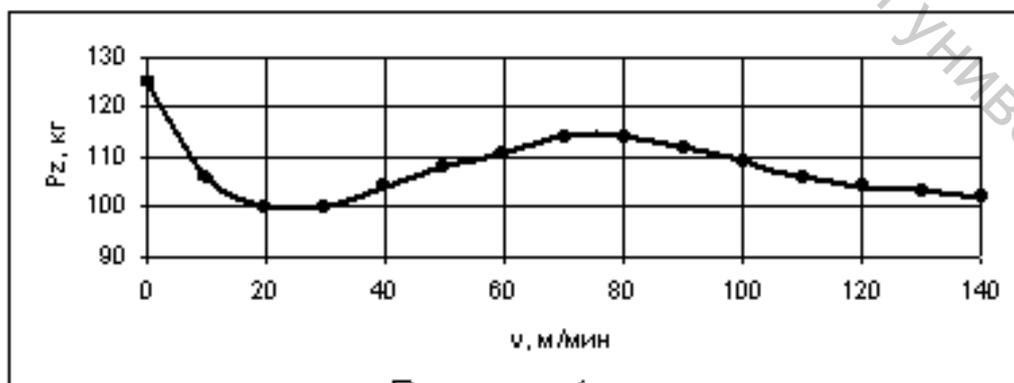


Рисунок 1

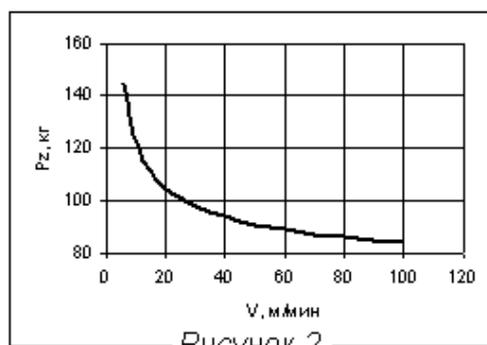


Рисунок 2

В общем случае обработки сталей зависимость силы  $P_z$  от скорости резания  $v$  имеет вид, показанный на рис. 1. В диапазоне больших скоростей (больших 80...100 м./мин.) с увеличением скорости сила резания уменьшается, а в диапазоне скоростей, в котором работают инструменты из быстрорежущей стали, наоборот – увеличивается. Исключением является обработка титановых и медных сплавов. На рис. 2 показана зависимость силы  $P_z$  от  $v$  для сплава ВТ15. Эмпирическая модель зависимости силы  $P_z$  при точении стальных заготовок инструментом из твердого сплава (т.е. при больших скоростях) имеет вид

$P_z = 10 \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot V^{-n_1}$ . Тогда зависимость мощности от показателей

режима резания будет иметь вид  $N_p = B_1 \cdot V^{1-n_1}$ , где

$$B_1 = \frac{C_p \cdot a^{x_1} \cdot s^{y_1}}{6120}.$$

Подставив в модель 1 выражение для мощности и зависимость  $t_o$  от скорости резания  $t_o = A/v$ , где при точении  $A = L/s$ ,  $L$  – длина рабочего хода,  $s$  – подача, известную зависимость стойкости от показателей режима резания  $T = B^\mu / v^\mu$ , где  $B = C_V / (a^x \cdot s^y)$ , получим окончательное выражение для функции цели (при точении стали твердосплавным резцом):

$$ПЗ = E \cdot \left[ \frac{A}{V} + \left( t_{cu} + \frac{3u}{E} \right) \frac{A}{B^\mu} V^{\mu-1} \right] + A \cdot E_1 \cdot B_1 \cdot V^{-n_1}. \quad (2)$$

В справочной литературе [1] согласно эмпирическим моделям сила  $P_z$  при обработке быстрорежущим инструментом не зависит от скорости резания. Однако при предварительной обработке с большими сечениями среза этой зависимостью нельзя пренебречь. Если использовать результаты экспериментов, показанные на рисунках 1 и 2, то можно уточнить известные эмпирические модели. Например,

типовая модель при точении имеет вид  $P_z = C_p \cdot a^x \cdot s^y$ . Ее следует заменить

моделью  $P_z = C_{p_1} \cdot a^x \cdot s^y \cdot V^z$ .

Чтобы определить значения  $C_{p_1}$  и  $z$ , запишем последнюю модель для двух значений скорости резания  $V_1$  и  $V_2$  в выбранном диапазоне (например, стали 30...55 м/мин).  $P_{z_1} = C_{p_1} \cdot a^x \cdot s^y \cdot V_1^z$  и  $P_{z_2} = C_{p_1} \cdot a^x \cdot s^y \cdot V_2^z$ . Поделив первую модель на вторую, получим формулу для определения параметра  $z$ :

$$z = \frac{\ln(P_{z_1} / P_{z_2})}{\ln(V_1 / V_2)},$$

где  $P_{z_i}$  соответствует на графике (рис. 1 и 2) скорости  $v_i$ .

Обозначим  $P_{z_{cp}} = (P_{z_1} + P_{z_2}) / 2$  и  $P_{z_2} / P_{z_1} = K_p$ . Затем, поделив новую

модель на традиционную  $\frac{P_{z_2}}{P_{z_{cp}}} = \frac{C_{p1} \cdot a^x \cdot s^y \cdot V_2^z}{C_p \cdot a^x \cdot s^y}$ , получим

$$C_{p1} = C_p \cdot \frac{2 \cdot K_p}{1 + K_p} \cdot \frac{1}{V_2^z} \quad \text{и} \quad V_{cp} = V_2 \cdot \left( \frac{1 + K_p}{2 \cdot K_p} \right)^{1/z}.$$

На основании анализа графика, приведенного на рис. 2, получены значения  $z = 0,19$  и  $C_{p1} = 64,88$ . А для случая точения резцом из быстрорежущей стали  $z = -0,277$ , а  $C_{p1} = 79,9$ .

### 3. Определение оптимальной скорости резания

Чтобы определить оптимальную скорость резания при точении, необходимо производную от ПЗ по  $V$  приравнять к 0.

$$\frac{dПЗ}{dV} = E \cdot \left[ -\frac{A}{V^2} + \left( t_{cu} + \frac{3u}{E} \right) \frac{A}{B^\mu} \cdot (\mu - 1) \cdot V^{\mu-2} \right] - n_1 \cdot E_1 \cdot B_1 \cdot A \cdot V^{-n_1-1} = 0$$

Если полученное выражение умножим на  $V^2$  и поделим на  $E$  и  $A$ , то получим

$$\left( t_{cu} + \frac{3u}{E} \right) \cdot \frac{\mu - 1}{B^\mu} \cdot V_{onm}^\mu - \frac{n_1 \cdot B_1 \cdot E_1}{E} V_{onm}^{1-n_1} = 1.$$

Откуда 
$$V_{onm} = \frac{B}{\left[ (\mu - 1) \cdot \left( t_{cu} + \frac{3u}{E} \right) \right]^m} \cdot \left[ 1 + \frac{n_1 \cdot B_1 \cdot E_1}{E} \cdot V_{onm}^{1-n_1} \right]^m.$$

Подставив значения  $B$  и  $B_1$ , получим

$$V_{onm} = \frac{C_V}{T_3^m \cdot a^x \cdot s^y} \cdot \left[ 1 + \frac{n_1 \cdot E_1 \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot s^{y_1}}{6120 \cdot E} \cdot V_{onm}^{1-n_1} \right]^m \quad (3)$$

Аналогично получена математическая модель для определения оптимальной скорости фрезерования. Стойкость в данном случае определяется моделью

$$T = \frac{B_1^\mu}{V^\mu}, \quad \text{где} \quad B_1 = \frac{C_V \cdot D^q}{a^x \cdot z^p \cdot s_z^y \cdot B^u}, \quad D - \text{диаметр фрезы, } z - \text{число зубьев}$$

фрезы,  $s_z$  – подача на зуб,  $B$  – ширина заготовки. А эффективная мощность, затрачиваемая на резание, определяется согласно модели

$$N = B_2 \cdot V^{1-w}, \quad \text{где} \quad B_2 = \pi^w \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot z \cdot s_z^{y_1} \cdot B^{n_1} / (6120 \cdot D^{q_1-w}). \quad \text{Тогда}$$

$$V_{onm} = \frac{C_V \cdot D^q}{T_3^m \cdot a^x \cdot z^p \cdot s_z^y \cdot B^u} \cdot \left( 1 + \frac{E_1}{E} \cdot \frac{w \cdot \pi^w \cdot C_p \cdot a^{x_1} \cdot z \cdot s_z^{y_1} \cdot B^{n_1}}{6120 \cdot D^{q_1 - w}} \cdot V_{onm}^{1-w} \right)^m \quad (4)$$

Данные уравнения легко можно решить методом итераций.

Выводы

Расчеты показали, что в зависимости от отношения удельных затрат на электроэнергию и эксплуатацию рабочего места ( $E_1 / E$ ) скорость резания, рассчитанная по новой модели, получается на 5 ...15 % больше, чем скорость резания, рассчитанная без учета затрат на электроэнергию. То есть оптимизация скорости резания по-новому не только обеспечивает некоторую экономию энергоресурсов, но и обеспечивает, пусть небольшое, повышение производительности.

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

Analytically, on baseline of known empirical models formulas for definition of optimum speed of shearing are received at turning and milling in view of expenses for the technological electric power. Efficiency of calculations on new mathematical models depends on the attitude of expenses for kWh of the electric power and expenses for maintenance of a workstation. Optimization of speed of shearing on new not only provides some economy of power resources, but also provides, let small, raise of productivity.

УДК 621.865.8 : 658.52.011.56

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА, СУБЪЕКТА И ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ В КОМПАКТНОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Д.Н. Свирский*

Производственная система (как и любой другой искусственный объект) имеет своим назначением вполне определенную цель, в конкретном случае – изготовление конкурентоспособной машиностроительной продукции. В настоящем исследовании используется общепринятая в кибернетике точка зрения на цель как на желаемый результат  $Y$ . Для его получения (т.е. достижения цели) необходимы некоторые ресурсы  $X$  (рис. 1) и процесс (средства) их преобразования  $W$ .



Рисунок 1 – Производственная система как «черный ящик»