

В.Д.Смолин

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ
ДЛЯ НАРУЖНОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Задачу оптимизации режимов резания применительно к однопроходной продольной токарной обработке можно сформулировать следующим образом.

Вначале требуется определить подачу и скорость резания, при которых целевая функция

$$\theta = \frac{\pi D L}{1000 V S} \left(E_{ст} \frac{E_{ст} T_{см} + S_{р.и}}{T} \right), \quad (1)$$

- где θ - затраты, обусловленные технологической операцией;
 D - диаметр обрабатываемой поверхности;
 L - длина обработки;
 V - скорость резания;
 S - величина продольной подачи;
 $E_{ст}$ - затраты, обусловленные 1 мин работы станка, на котором выполняется данная технологическая операция (без учета затрат на режущий инструмент);
 $S_{р.и}$ - затраты, связанные с амортизацией, заточкой и эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости;
 $T_{см}$ - время смены и подналадки инструмента за период его стойкости;
 T - период стойкости резца, величина которого назначается из условия минимума θ ;

принимает наименьшее значение при нижеследующих технических ограничениях:

1. Ограничение по заданной точности обработки [1]

$$\Delta_p = a \left\{ \left(t - \frac{\Delta_p}{2} \right)^{X_{py}} + k \left[\left(t + \delta_{зв} - \frac{\Delta_p}{2} \right)^{X_{py}} - \left(t + \delta_{зн} - \frac{\Delta_p}{2} \right)^{X_{py}} \right] \right\} S^{y_{py}} V^{n_y} + \quad (2)$$

$$+ b \left(t - \frac{\Delta_p}{2} \right)^{X_{px}} S^{y_{px}} V^{n_x},$$

- где Δ_p - величина погрешности обработки, обусловленная упругими деформациями системы СПИД под действием усилия резания;
 t - заданная глубина резания;

$\delta_{зв}$ и $\delta_{зн}$ - верхняя и нижняя границы допуска на диаметр заготовки;

$X_{рy}$, $U_{рy}$, Π_y , $X_{рx}$, $U_{рx}$, Π_x - показатели степени в формулах для составляющих силы резания;

K - коэффициент теоретико-вероятностного суммирования.

Для точения в центрах

$$\alpha = 2C_{рy} K_{рy} \left[\frac{1}{j_{суп}} + \frac{1}{j_{пб}} \frac{X^2}{L^2} + \frac{1}{j_{зб}} \frac{(L-X)^2}{L^2} + \frac{(L-X)^2 X^2}{3K_y E J L} \right],$$

где $C_{рy}$ - коэффициент в формуле для радиальной составляющей усилия резания, характеризующий условия обработки, для которых были разработаны нормативы;

$K_{рy}$ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние измененных условий (сравнительно с нормативными) на величину радиальной составляющей усилия резания;

$j_{суп}$ - жесткость суппорта;

$$\frac{1}{j_{пб}} = \frac{1}{j_{пб ст}} + \frac{1}{j_{пч}} ,$$

$j_{пб ст}$ - жесткость передней бабки согласно данным статических испытаний;

$j_{пч}$ - жесткость установки изделия на переднем центре;

X - расстояние от торца детали со стороны задней бабки по рассматриваемого сечения;

$$\frac{1}{j_{зб}} = \frac{1}{j_{зб ст}} + \frac{1}{j_{зч}} ,$$

$j_{зб ст}$ - жесткость задней бабки согласно данным статических испытаний;

$j_{зч}$ - жесткость установки изделия на заднем центре;

K_y - коэффициент, учитывающий заземление детали на центрах;

E - модуль упругости обрабатываемого материала;

J - момент инерции сечения детали (для случая точения гладкого валика

$$J = 0,05 \left[\frac{D_x + D_{заг} (L-x)}{L} \right]^4 ,$$

где $D_{заг}$ - диаметр заготовки).

$$b = C_{P_x} K_{P_x} \frac{D}{L^2} \left[\frac{\chi}{j_{пб}} - \frac{L-\chi}{j_{эб}} - \frac{\chi L(L-\chi)(L-2\chi)}{3K_c E J} \right],$$

где C_{P_x} - коэффициент в формуле для составляющей силы резания, действующей вдоль оси заготовки параллельно направлению подачи;

K_{P_x} - поправочный коэффициент, учитывающий влияние измененных условий обработки.

Для точения в патроне

$$a = 2C_{P_y} K_{P_y} \left[\frac{1}{j_{пб ст}} + \frac{1}{j_{суп}} + \frac{(L_0 + L - \chi)^2}{j_{\psi}} + \frac{(L - \chi)^3}{3EJ} \right],$$

где j_{ψ} - угловая жесткость системы "деталь-передняя бабка";

L_0 - расстояние от торца кулачков патрона до мгновенного центра поворота системы "деталь-передняя бабка" (величины L_0 и j_{ψ} являются упругими характеристиками системы СПИД, их можно определить по методике, изложенной в ГОСТ 18097-72, с внесением в нее небольших изменений).

$$b = C_{P_x} K_{P_x} D \left[-\frac{L_0 + L - \chi}{j_{\psi}} - \frac{(L - \chi)^2}{2EJ} \right]$$

2. Ограничение по заданной шероховатости обрабатываемой поверхности [2] для диапазона

$$10 \text{ м/мин} < V < \left(193 - \frac{2435}{R_{0,52}} \right); \quad (3)$$

$$R_z = \frac{S}{R_{0,52} \Delta \varphi_{1,0,04}} (98 - 0,5V), \quad (4)$$

где φ_1 - фактическая величина вспомогательного угла в плане;

R - радиус при вершине реза;

R_z - высота неровности;

$$\Delta \varphi_1 = \varphi_{1 \text{ пред}} - \varphi_1,$$

$$\varphi_{1 \text{ пред}} = \alpha \text{с} \sin \frac{S}{2R},$$

причем при $\varphi_1 \text{ пред} = \varphi_1$ следует принимать $\Delta\varphi_1 = 1$.
Для диапазона

$$V > \left(193 - \frac{2435}{R \cdot 0,52} \right); \quad (5)$$
$$R_z = R - \frac{\sqrt{4R^2 - S^2}}{2}$$

3. Ограничение по режимным возможностям инструмента

$$V = \frac{C_V}{T^m S^{S_V} t^{X_V}} K_V \quad (6)$$

где C_V - коэффициент, характеризующий условия обработки, для которых разрабатывались нормативные материалы;
 K_V - обобщенный поправочный коэффициент, учитывающий влияние измененных условий на величину скорости резания;
 m - показатель относительной стойкости. Границы области существования зависимости T - V устанавливаются в период стойкостных испытаний

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max};$$
$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max};$$
$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max};$$
$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$$

Для случая, когда ограничение режима резания производится по техническому ограничению, не включающему в себя скорость резания [3],

$$T = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \left(T_{\text{см}} + \frac{S_{\text{ори}}}{E_{\text{ст}}} \right) \quad (7)$$

В случае, если действующее ограничение является функцией подачи и скорости, оптимальную величину стойкости следует определять с учетом этого технического ограничения. Для этого в уравнение целевой функции следует ввести значения S и V , выраженные через T и найденные из совместного решения зависимости (6) и уравнения соответствующего ограничения.

Если действующее ограничение можно записать в виде $S = C_5 V^p$, где C_5 и p постоянные величины, то [4]

$$T_0 = \left[\frac{p y_v + 1}{m(p+1)} - 1 \right] \left(T_{cm} + \frac{S_{p.и}}{E_{ст}} \right)$$

Рассмотрим случай, когда ограничение режимов резания осуществляется по условию получения заданной точности. Систему уравнений (1,2,6) можно записать в виде

$$VS = \frac{1}{\theta} \left(C_1 + \frac{C_2}{T} \right),$$

$$VS^{y_v} = C_3 T^{-m},$$

$$C_4 S^{y_{py}} V^{n_y} + C_5 S^{y_{px}} V^{n_x} = \Delta p,$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 - постоянные, не зависящие от S и V .
Решение этой системы приводит к зависимости

$$\alpha \left\{ \left(t - \frac{\Delta p}{2} \right)^{x_{py}} + \kappa \left[\left(t + \delta_{зв} - \frac{\Delta p}{2} \right)^{x_{py}} - \left(t + \delta_{зн} - \frac{\Delta p}{2} \right)^{x_{py}} \right] \right\} \times$$

$$\times \left(\frac{t^{x_v}}{C_v K_v} \right)^{\frac{y_{py} - n_y}{1 - y_v}} \left(\frac{\pi D L E_{ст}}{1000} \right)^{\frac{y_{py} - y_v n_y}{1 - y_v}} T^{\frac{y_{py}(1-m) + n_y(m - y_v)}{y_v - 1}}$$

$$\times \left[\frac{1}{\theta} \left(T + T_{cm} + \frac{S_{p.и}}{E_{ст}} \right) \right]^{\frac{y_{py} - y_v n_y}{1 - y_v}} + \delta \left(t - \frac{\Delta p}{2} \right)^{x_{px}} \left(\frac{t^{x_v}}{C_v K_v} \right)^{\frac{y_{px} - n_x}{1 - y_v}} \times$$

$$\times \left(\frac{\pi D L E_{ст}}{1000} \right)^{\frac{y_{px} - y_v n_x}{1 - y_v}} T^{\frac{y_{px}(1-m) + n_x(m - y_v)}{y_v - 1}} \left[\frac{1}{\theta} \left(T + T_{cm} + \frac{S_{p.и}}{E_{ст}} \right) \right]^{\frac{y_{px} - y_v n_x}{1 - y_v}} = \Delta p,$$

которая представляет собой полином с переменными θ и T в дробных степенях, который принципиально не разрешим относительно θ или T , поэтому значение T , удовлетворяющее условию $d\theta/dT=0$, следует находить численным методом на ЭВМ.

Рассмотрим случай, когда на режимы резания накладывается ограничение по заданной шероховатости поверхности. Если определяемая скорость резания удовлетворяет условию (5), то техническое ограничение по шероховатости не зависит от скорости резания и величину оптимальной стойкости следует определять по формуле (7). Если определяемая скорость резания удовлетворяет условию (8), то оптимальную величину стойкости необходимо определить из решения системы уравнений (1,4,6).

Решение этой системы приводит к уравнению

$$196 \left(\frac{1000 C_V K_V}{\pi D L t^{0.53} E_{CT}} \right)^{\frac{1}{y_V-1}} \left(\frac{T^{1-m}}{T+T_{CM} + \frac{S_{PI}}{E_{CT}}} \right)^{\frac{1}{y_V-1}} \theta^{\frac{y_V}{y_V-1}} -$$

$$- 2R_z R^{0.53} \Delta \psi_1^{0.04} \theta = \frac{\pi D L E_{CT}}{1000} \frac{T+T_{CM} + \frac{S_{PI}}{E_{CT}}}{T}$$

Величина оптимальной стойкости и в этом случае находится по условию $d\theta/dT=0$.

Расчетную величину стойкости (T_0) следует проверить относительно интервала возможных значений стойкости $T_{min} - T_{max}$. В случае, если T_0 находится за пределами интервала $T_{min} - T_{max}$, то за величину оптимальной стойкости принимается ближайшая к расчетной граница интервала $T_{min} - T_{max}$. Полученный в этом случае режим резания будет находиться ближе других к оптимальному. Очевидно, что $T_0 \geq \tau$, где τ - время рабочего хода в минутах.

4. Ограничение по наименьшей глубине резания

$$t_{min} \geq \delta_{3n} + R_{z3} + T_3$$

где R_{z3} и T_3 - соответственно высота микронеровностей и глубина дефектного слоя заготовки.

5. Ограничение по мощности привода станка

$$N_{рез} < N_{прив.ст}$$

где $N_{прив.ст}$ - мощность, подведенная к шпинделю;

$N_{рез}$ - мощность, необходимая для снятия стружки.

Данное ограничение можно записать в развернутом виде

$$S^{y_{Pz}} V^{n_z+1} \leq \frac{102 \cdot 60 N_{э/б} \eta_{ст}}{C_{Pz} K_{Pz} t^{k_{Pz}}}$$

где $N_{э/б}$ - мощность приводного двигателя, кВт;
 $\eta_{ст}$ - коэффициент полезного действия станка
 ($\eta_{ст} = 0,75 - 0,8$).

6. Ограничение по слабому звену механизма подачи

$$Q_{под} \geq C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} V^{n_x} + f (C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} V^{n_y} K_{P_y} + C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} V^{n_z} K_{P_z} + G),$$

где $Q_{под}$ - допустимое усилие подачи;
 G - вес суппорта, включая шарик;
 f - коэффициент трения.

7. Ограничение по прочности резца (рассматривается сечение, ослабленное врезом пластинки)

$$\sigma_y^2 + 4\tau_y^2 \leq \frac{\sigma_T^2}{\eta_3^2},$$

где σ_T - предел текучести материала державки;
 η_3 - коэффициент запаса прочности;
 σ_y - нормальное напряжение

$$\sigma_y = \frac{P_y}{B(N-h)} + \frac{12P_y z \frac{N+h}{2}}{B(N-h)^3} + \frac{12P_y X \frac{B}{2}}{B^3(N-h)},$$

$$\chi = \frac{P_x}{P_y} \ell, \quad z = \frac{P_z}{P_y} \ell - \frac{N-h}{2},$$

где P_x, P_y, P_z - составляющие усилия резания;
 B и N - ширина и высота державки;
 h и ℓ - толщина и длина напаянной пластинки;
 τ_y - касательное напряжение

$$\tau_y = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{P_z^2 + P_x^2}{B(N-h)}}$$

8. Ограничение, налагаемое кинематикой станка,

$$S_{\max \text{ ст}} \geq S \geq S_{\min \text{ ст}} ;$$

$$V_{\max \text{ ст}} \geq V \geq V_{\min \text{ ст}} ,$$

где $S_{\min \text{ ст}}$ и $S_{\max \text{ ст}}$ - соответственно наименьшая и наибольшая подачи станка, приводимые в его паспорте;

$V_{\min \text{ ст}}$ и $V_{\max \text{ ст}}$ - наименьшая и наибольшая скорости резания, определяемые по нижнему и верхнему пределу чисел оборотов шпинделя станка.

Коэффициент теоретико-вероятностного суммирования, входящий в ограничение по точности [5],

$$K = \frac{\frac{1}{3} \Phi^{-1} \left(1 - \frac{P}{50}\right) \sqrt{\sum_{i=1}^m [(1 - Me_i)^2 + 3Me_i^2] d_i^2}}{\sum_{i=1}^m d_i} \quad (8)$$

где Me_i - величина отношения поля рассеивания систематической переменной составляющей погрешности обработки к допуску;

d_i - отношение допуска i -го составляющего звена линейной размерной цепи к величине наименьшего из звеньев;

P - возможный процент риска при выходе значений замыкающего звена цепи за предел одной границы расчетного поля допуска;

Φ - функция Лапласа.

Для наружного точения формула (8) приобретает вид

$$K = \frac{\frac{1}{3} \Phi^{-1} \left(1 - \frac{P}{50}\right) \sqrt{\omega_{\text{дет}}^2 + \omega_{\text{ст}}^2}}{\omega_{\text{дет}} + \omega_{\text{ст}}} \quad (9)$$

где

$$\omega_{\text{дет. патр}} = 2 \frac{(L-x)^4}{3EJ} C_{py} [(t+\delta_{3в})^{x_{py}} - (t+\delta_{3н})^{x_{py}}] S^{y_{py}} V^{n_{py}} K_{py} ;$$

$$\omega_{\text{дет. центр}} = 2 \frac{(L-x)^2 x^2}{3K_{ц} EJL} C_{py} [(t+\delta_{3в})^{x_{py}} - (t+\delta_{3н})^{x_{py}}] S^{y_{py}} V^{n_{py}} K_{py} ;$$

$$\omega_{\text{ст. патр}} = 2 \left[\frac{1}{J_{нб}} + \frac{1}{J_{суп}} + \frac{(L_0 + L - x)^2}{J_{\psi}} \right] C_{py} [(t+\delta_{3в})^{x_{py}} - (t+\delta_{3н})^{x_{py}}] S^{y_{py}} V^{n_{py}} K_{py} ;$$

$$\omega_{\text{ст.цент}} = 2 \left[\frac{1}{J_{\text{суп}}} + \frac{1}{J_{\text{нб}}} \left(\frac{X}{L} \right)^2 + \frac{1}{J_{\text{зб}}} \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 \right] \times \\ \times C_{P_y} \left[(t + \delta_{\text{зв}})^{X_{P_y}} - (t + \delta_{\text{зп}})^{X_{P_y}} \right] S^{Y_{P_y}} V^{P_y} K_{P_y}. \quad (10)$$

Таким образом, установлен конкретный вид целевой функции и ряд технических ограничений, поддающихся удовлетворительной формализации. В данной постановке задача относится к классу задач нелинейного программирования. В настоящее время разработаны строгие решения только для некоторых частных случаев этой задачи. Суть оптимизации режима резания заключается в том, чтобы найти в множестве допустимых техническими ограничениями режимов резания точку (S_0, V_0) , минимизирующую целевую функцию.

Если в координатах $S-V$ построить график целевой функции (1'), исходя из условия $\theta = \text{const}$, то получим выпуклую вниз кривую, не имеющую экстремума. Причем, чем меньше значение θ , тем дальше от начала координат будет находиться кривая, т.е. точке из области допустимых режимов резания, наиболее удаленной от начала координат, отвечает минимум θ .

Анализ приведенной математической модели показывает, что наиболее удаленную точку от начала координат на области допустимых значений режимов резания определяют ограничение (6) и одно из лимитирующих ограничений: по точности, шероховатости и т.д. Таким образом, для того, чтобы найти оптимальное решение, следует последовательно разрешить уравнения технических ограничений с уравнением (6) относительно S и V и выбрать из полученного ряда решений такое сочетание S_0, V_0 , в котором S_0 является наибольшей технологически допустимой подачей.

Л и т е р а т у р а

1. С м о л и н В.Д. Расчет точностных режимов резания при наружном точении. В сб.: "Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов". Межвузовский сборник. Вып. 1. Куйбышев, 1973.
2. Развитие науки о резании металлов. М., "Машиностроение", 1967.
3. В е л и к а н о в К.М., Н о в о ж и л о в В.И. Экономичные режимы резания металлов. Л., "Машиностроение", 1972.
4. Адаптивное управление металлорежущими станками. С-1, Станко-строение, М., НИИмат, 1973.

5. Ш е в е л е в А.С. Расчет возможной величины поля допуска замыкающего размера линейных размерных цепей. В сб.: "Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении". М., 1967, № 5.

Ю.А.Розенберг

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ АСУ СТАНКАМИ

Одним из современных методов повышения производительности и сокращения времени на подготовку производства является применение автоматических систем управления (АСУ) и, в том числе, числового программного управления (ЧПУ) металлорежущими станками. Возможность получения математически точных контурно-пространственно-сложных поверхностей путем обработки по программе без предварительного изготовления шаблонов и специальных приспособлений позволяет при применении станков с ЧПУ значительно сократить ряд подсистем в системе подготовки производства. С другой стороны, появляется новая подсистема подготовки программ обработки. Недостатками данной подсистемы в настоящее время являются большое количество итераций при подготовке программы, отсутствие оптимальности условий резания и нестабильность результатов работы станка по подготовленной программе вследствие изменения условий взаимодействия системы СПИД (нестабильность свойств заготовки, износ инструмента и др.).

Методы подготовки программ обработки должны разрабатываться с позиций действия АСУ станком в целом. Все другие подходы будут давать только частные решения. Оптимальная программа-часть АСУ станком, обеспечивающая получение оптимальных условий резания по одному из критериев: точности обработки, производительности и себестоимости обработки. При этом другие критерии, а также качество обработанных поверхностей, условия безвибрационного резания и условия надежного стружкозаивания или стружкодробления принимаются в виде ограничений.

Изучение и создание АСУ станками является сложной, комплексной и многофакторной задачей, требующей рассмотрения явлений в единстве их развития, взаимосвязанности и целостности. Решение такой задачи