



Уральский  
федеральный  
университет

# Современные задачи оптимизации режимов эксплуатации металлорежущего оборудования

Докладчик  
**Скаредин Антон Александрович**

Студент группы НМТМ-182501  
ИНМиТ



# Что такое оптимизация?

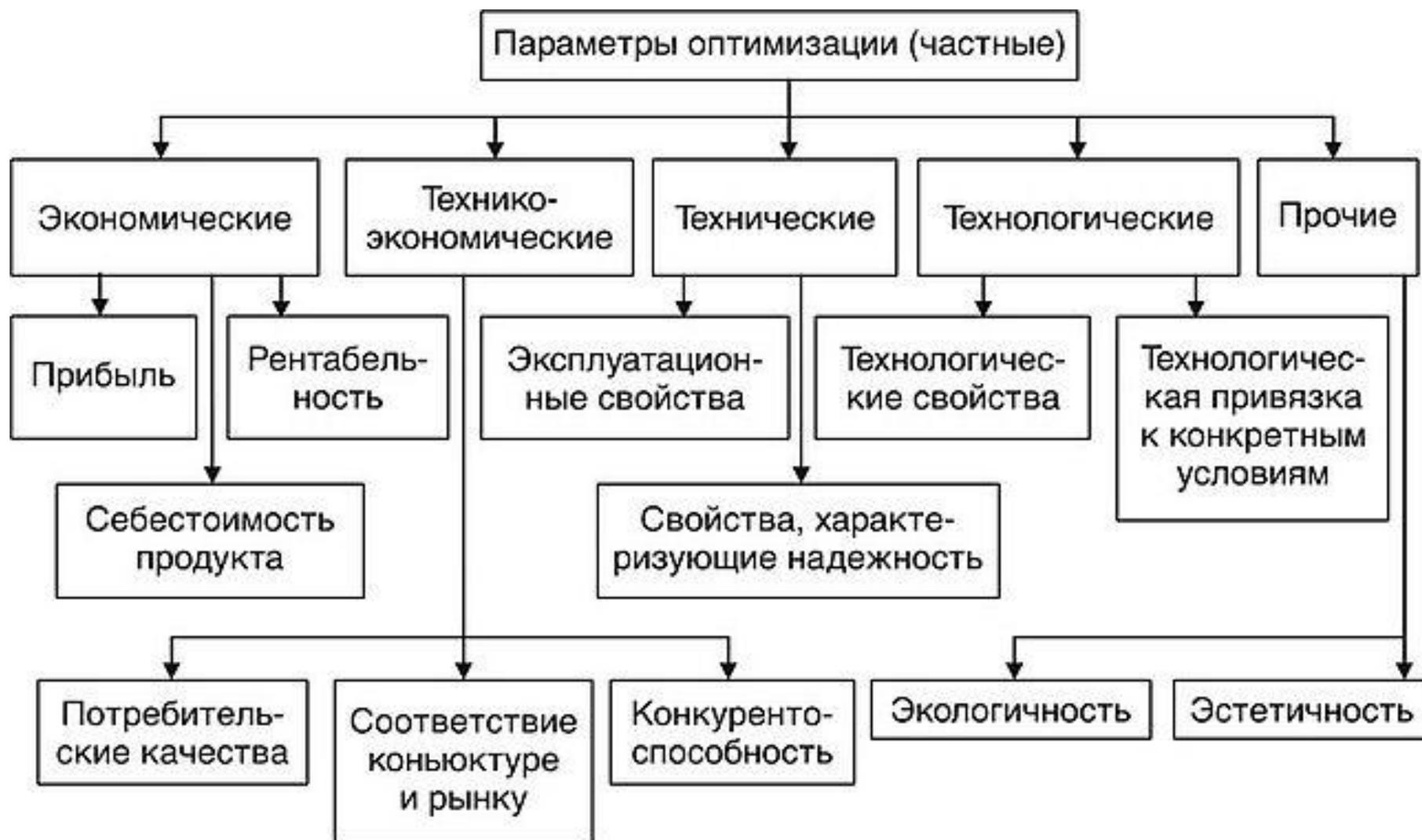
**Оптимизация** (от лат. optimum - наилучшее) – процесс выбора наилучшего варианта решения из множества возможных, путь достижения цели при данных условиях и ресурсах или процесс приведения системы в наилучшее состояние.



# С чего начать оптимизацию?

- 1) Что значит лучше?
- 2) Что конкретно нужно улучшить?
- 3) За счет чего можно добиться улучшения, что можно изменить?
- 4) В каких пределах можно производить изменения?

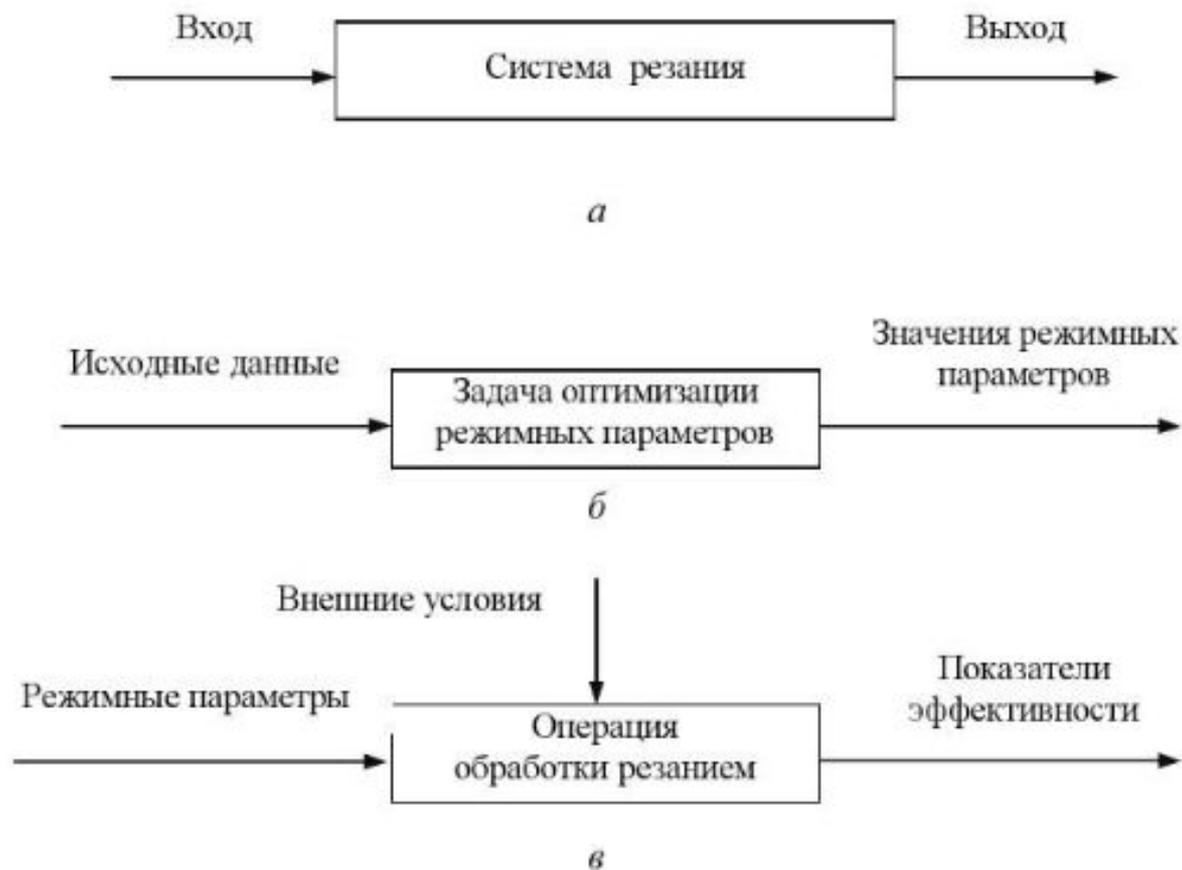




# Анализ процесса механической обработки

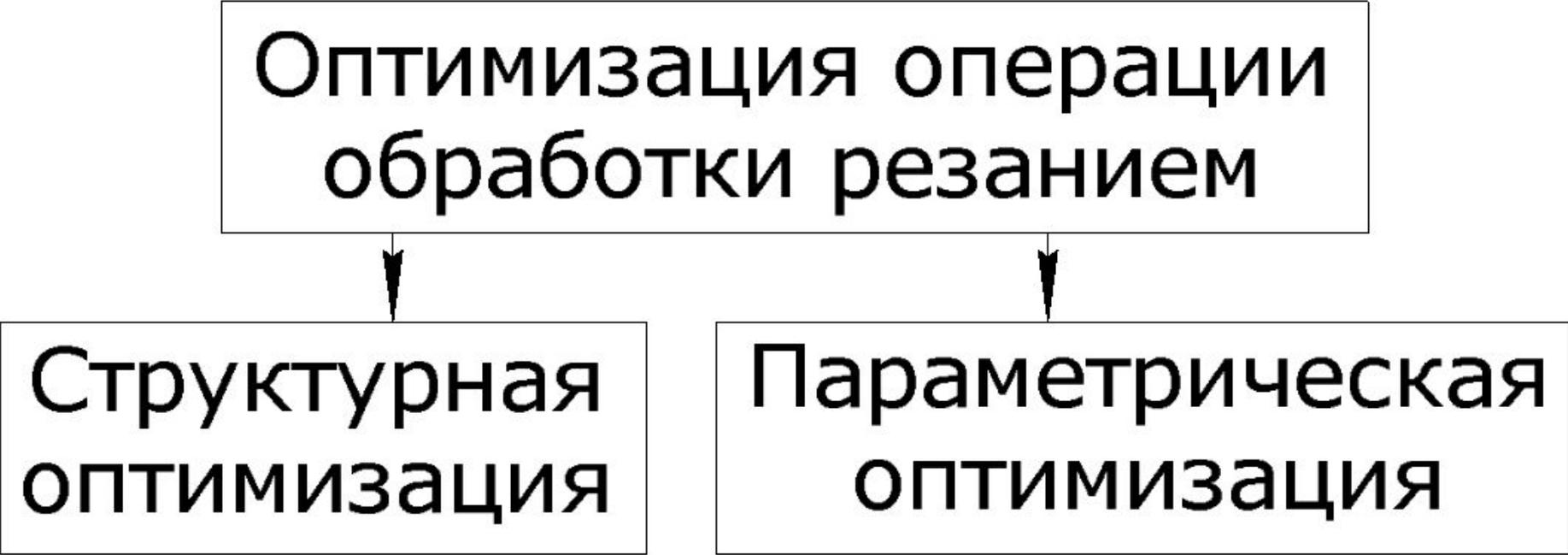
**Техническая система** — это совокупность взаимосвязанных элементов, представляющих единое целое и действующих в рамках более сложной системы, в которую она **входит**.





**Рис. 1.** Примеры технических систем:  
*a* — система резания; *б* — оптимизационная задача;  
*в* — операция обработки резанием

Оптимизация операции  
обработки резанием



```
graph TD; A[Оптимизация операции обработки резанием] --> B[Структурная оптимизация]; A --> C[Параметрическая оптимизация];
```

Структурная  
оптимизация

Параметрическая  
оптимизация

# Этапы решения задачи оптимизации

- 1) Выделение процесса резания из общей технологической системы, характеризующей операцию
- 2) Разработка математической модели процесса и ее анализ
- 3) Математическая формулировка цели, критериев оптимизации и ограничений
- 4) Алгоритмизация, программирование, расчет
- 5) Обобщение результатов, реализация обработки заготовки на расчетных режимных параметрах — если цель достигнута, или декомпозиция системы и возврат к началу анализа — в противном случае

# Математические модели и уравнения

**Аналитические** математические модели представляют собой знакосимвольные выражения, отражающие связь выходных переменных с входными и написанные общепринятым языком математических формул.

**Алгоритмические** математические модели описывают изучаемый процесс в виде алгоритма.

**Имитационное** моделирование основано на прямом описании процесса и структурном подобии объекта и модели

**Теоретические** модели создаются в результате исследования процесса на теоретическом уровне с использованием известных физических законов.

**Эмпирические** модели отражают результаты лабораторных или производственных экспериментов и наблюдений.

**Детерминированные** математические модели описывают процесс резания с позиции полной определенности и однозначности условий в настоящем и будущей,

**Вероятностные** (стохастические) модели учитывают влияние случайных факторов (например, разброс поверхностной твердости заготовок в партии, колебаний припуска и др.) на выходные переменные процесса резания.

# Уравнения для расчета параметров лезвийной обработки

- *Точение* (скорость резания, тангенциальная составляющая силы, радиальная составляющая силы, параметр шероховатости):

$$v = \frac{C_v K_v}{T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v} \cdot 60}; \quad P_z = \frac{9,81 C_p t^{x_p} s^{y_p} K_p}{(v \cdot 60)^{n_p}}; \quad (1.1)$$

$$P_y = \frac{9,81 C_{py} t^{x_{py}} s^{y_{py}} K_{py}}{(v \cdot 60)^{n_{py}}}; \quad Ra = k_0 \frac{s^{k_1} (90 + \gamma)^{k_4}}{r^{k_2} v^{k_3}},$$

где  $T$  — стойкость инструмента, мин;  $t$  — глубина резания, мм;  $s$  — подача, мм/об;  $r$  — радиус при вершине резца, мм;  $\gamma$  — передний угол, град.

- *Сверление* (скорость резания, осевая составляющая силы, крутящий момент, параметр шероховатости):

$$v = \frac{C_v d^{q_v} K_v}{T^{m_v} s^{y_v} \cdot 60}; \quad P_0 = 9,81 C_p d^{q_p} s^{y_p} K_p; \quad (1.2)$$

$$M = 9,81 C_m d^{q_m} s^{y_m} (v \cdot 60)^{m_m} K_m; \quad Ra = C_R d^{q_R} (v \cdot 60)^{n_R} s^{y_R},$$

где  $d$  — диаметр сверла, мм.

- *Зенкерование, развертывание* (скорость резания, параметр шероховатости):

$$v = \frac{C_v d^{q_v} K_v}{T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v} \cdot 60}; \quad Ra = C_R d^{q_R} (v \cdot 60)^{n_R} s^{y_R}, \quad (1.3)$$

где  $d$  — диаметр инструмента, мм;  $t$  — глубина резания, мм.

- *Фрезерование* (скорость резания, тангенциальная составляющая силы, параметр шероховатости):

$$v = \frac{C_v d^{q_v} K_v}{T^{m_v} t^{x_v} s_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v} \cdot 60};$$

$$P_z = \frac{9,81 C_p t^{x_p} s_z^{y_p} B^{u_p} z^{p_p} K_p}{d^{q_p} n^{w_p}}; \quad Ra = \frac{C_R s_z^{y_R} t^{x_R}}{(v \cdot 60)^{n_R} r^{k_{R1}} \gamma^{k_{R2}}},$$
(1.4)

где  $d$  — диаметр, мм,  $z$  — число зубьев фрезы;  $B$  — ширина фрезерования, мм;  $s_z$  — подача на зуб, мм;  $n$  — частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $r$  — радиус при вершине, мм;  $\gamma$  — передний угол зуба фрезы, град.

- *Резьбонарезание метчиком, плашкой* (скорость резания, крутящий момент):

$$v = \frac{C_v d^{q_v} K_v}{T^{m_v} p^{y_v} \cdot 60}; \quad M = 9,81 C_m d^{q_m} p^{y_m} K_m, \quad (1.5)$$

где  $d, p$  — диаметр, шаг нарезаемой резьбы, мм.

- *Резьбонарезание резцом* (скорость резания, тангенциальная составляющая силы):

$$v = \frac{C_v i^{x_v} K_v}{T^{m_v} p^{y_v} \cdot 60}; \quad P_z = \frac{9,81 C_p p^{y_p} K_p}{i^{x_p}}, \quad (1.6)$$

где  $i$  — число проходов.

- *Зубофрезерование червячными фрезами (скорость резания, мощность):*

$$v = \frac{C_v K_v}{T^{m_v} s^{y_v} m_n^{x_v} \cdot 60}; \quad N = 6 \cdot 10^{-2} C_n s^{y_n} m_n^{x_n} d^{q_n} v K_n, \quad (1.7)$$

где  $s$  — подача фрезы на оборот колеса, мм/об;  $m_n$  — нормальный модуль, мм;  $d$  — диаметр фрезы, мм.

$$T = \frac{C_T s^{b_2} K_{TFP} K_{TC}}{v^{1/m_v} t^{b_1} e^{(c_1 t + c_2 s)} (1,5 - h_z)^{\bar{\varepsilon}_1}},$$

где  $T$  — стойкость, мин;  $h_z$  — износ инструмента, мм;  $K_{TFP}$ ,  $K_{TC}$  — поправочные коэффициенты на форму режущей пластины и наличие смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);  $e$  — основание натурального логарифма.

# Метод линейного программирования

$$L = f_0(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \min (\max);$$

$$f_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n a_{1i} x_i \leq b_1, \quad \dots, \quad f_g(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n a_{gi} x_i \leq b_g;$$

$$f_{g+1}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n a_{g+1,i} x_i = 0, \quad \dots, \quad f_h(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n a_{hi} x_i = 0,$$

где  $x_1, \dots, x_n$  — неотрицательные переменные, функционально связанные с режимными параметрами.

# Целевая функция

$$y = f_0(\mathbf{X}) \rightarrow \min, \quad \mathbf{X} \in \Omega,$$

где  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (v, s_1, s_2, \dots)^T$  — вектор переменных, режимных переменных, в частном случае — параметров.

Область  $\Omega$  является областью допустимых значений режимных переменных и задается системой технологических *ограничений* в виде уравнений, в общем случае неравенств и равенств:

$$f_1(\mathbf{X}) \leq 0, \quad f_2(\mathbf{X}) \leq 0, \quad \dots, \quad f_g(\mathbf{X}) \leq 0, \quad f_{g+1}(\mathbf{X}) = 0, \quad \dots, \quad f_h(\mathbf{X}) = 0. \quad (2.2)$$

# Оптимизация режимных параметров чистового точения методом линейного программирования

В качестве примера использования метода ЛП рассмотрим оптимизацию режимных параметров чистового точения заготовки из закаленной стали марки ШХ15 (HRC 62) резцами из композита 01 (эльбора-Р). Условия операции были выбраны следующими: диаметр заготовки  $d = 50$  мм, длина (с учетом врезания и перебега резца)  $l = 500$  мм, глубина резания  $t = 0,2$  мм, стойкость инструмента  $T = 60$  мин, радиус при вершине резца  $r = 0,6$  мм, станок токарный мод. МК 6801Ф3, мощность привода главного движения  $N_{st} = 11$  кВт, заданная производительность обработки  $Q_z = 0,03$  шт./мин, шероховатость обработанной поверхности  $Ra_z = 0,63$  мкм. Целевая функция имеет вид (2.6). Для выражения технологических ограничений использованы степенные уравне-

ния (1.1); показатели степеней, постоянные и коэффициенты заимствованы из литературных источников:  $C_v = 681,5$ ;  $K_v = 1$ ;  $m_v = 0,606$ ;  $x_v = 0,18$ ;  $y_v = 0,3$ ;  $C_p = 41,3$ ;  $x_p = 1$ ;  $y_p = 0,65$ ;  $n_p = 0,15$ ;  $K_p = 1$ ;  $C_{p_y} = 33,12$ ;  $x_{p_y} = 0,88$ ;  $y_{p_y} = 0,58$ ;  $n_{p_y} = 0,15$ ;  $K_{p_y} = 1$ ;  $k_0 = 20,77$ ;  $k_1 = 1,3$ ;  $k_2 = 0,4$ ;  $k_3 = 0,2$ ;  $k_4 = 0$ .

Учтем следующие ограничения.

- По стойкости инструмента (допустимой скорости):

$$n(100s)^{y_v} \leq \frac{318C_v K_v \cdot 100^{y_v}}{T^{m_v} t^{x_v} d};$$

$$x_1 + y_v x_2 \leq b_1.$$

Множитель 100 введен для того, чтобы исключить отрицательные значения логарифмов при малых значениях подач. Таким образом, задача решается относительно переменных  $x_1$ ,  $x_2$ , функционально связанных с режимными параметрами  $n$ ,  $s$ .

- По мощности двигателя станка:

$$n^{(1-n_p)} (100s)^{y_p} \leq \frac{6,1 \cdot 100^{y_p} N_{st} \eta_{st}}{1000^{n_p} C_p (\pi d)^{(1-n_p)} t^{x_p} K_p K_w};$$

$$(1 - n_p)x_1 + y_p x_2 \leq b_2.$$

- По производительности обработки:

$$b_3 = \ln \{100 Q_z l [(1 + \varepsilon)(1 + a_{obs} / 100) + T_{cm} / T]\};$$

$$x_1 + x_2 \geq b_3,$$

где соотношение вспомогательного и основного времени  $\varepsilon = 0,56$ .

- По диапазонам режимных параметров:

$$x_1 \geq b_4; \quad b_4 = \ln(6 \cdot 10^4 v_{\min} / (\pi d)); \quad v_{\min} = 0,5 \text{ м/с};$$

$$x_1 \leq b_5; \quad b_5 = \ln(6 \cdot 10^4 v_{\max} / (\pi d)); \quad v_{\max} = 6,0 \text{ м/с};$$

$$x_2 \geq b_6; \quad b_6 = \ln(100 s_{\min}); \quad s_{\min} = 0,02 \text{ мм/об};$$

$$x_2 \leq b_7; \quad b_7 = \ln(100 s_{\max}); \quad s_{\max} = 0,25 \text{ мм/об}.$$

- По шероховатости обработанной поверхности:

$$Ra = \frac{k_0 s^{k_1}}{r^{k_2} v^{k_3}} \leq Ra_z;$$

$$-k_3 x_1 + k_1 x_2 \leq \ln \left[ \frac{Ra_z \cdot 100^{k_1} r^{k_2} d^{k_3}}{k_0 \cdot 19\,080^{k_3}} \right]; \quad -k_3 x_1 + k_1 x_2 \leq b_8.$$

- По точности обработки:

$$y = P_y / j_y \leq (0,5\delta),$$

где  $y$  — деформация заготовки под действием составляющей силы резания  $P_y$ ;  $j_y$  — жесткость заготовки;  $\delta = 0,02$  мм — допуск на обрабатываемый размер.

При креплении заготовки в центрах и передаче крутящего момента рифленным центром наибольшая деформация будет в середине, тогда

$$j_y = 3\pi d^4 E / (4l^3),$$

где  $E$  — модуль Юнга.

После преобразований имеем

$$-n_{p_y} x_1 + y_{p_y} x_2 \leq \ln \left[ \frac{100^{y_{p_y}} j_y d^{n_{p_y}} (0,5\delta)}{9,81 C_{p_y} t^{x_{p_y}} \cdot 318^{n_{p_y}} K_{p_y}} \right];$$

$$-n_{p_y} x_1 + y_{p_y} x_2 \leq b_9.$$

По результатам расчетов получена система линейных ограничений:

$$x_1 + 0,3x_2 \leq 7,56;$$

$$0,85x_1 + 0,65x_2 \leq 13,17$$

$$x_1 + x_2 \geq 7,88;$$

$$x_1 \geq 5,25;$$

$$x_1 \leq 7,74;$$

$$x_2 \geq 0,69;$$

$$x_2 \leq 3,22;$$

$$-0,2x_1 + 1,3x_2 \leq 1,10;$$

$$-0,15x_1 + 0,58x_2 \leq 3,58.$$

