

УДК 621.01

## **Методика повышения точности системы позиционирования металлорежущих станков**

Цзи Ш<sup>1,\*</sup>, Чернянский П. М.<sup>1</sup>

[\\*jisc1988@sina.com](mailto:jisc1988@sina.com)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Качество обработки на металлорежущих станках непосредственно связано с его точностью, которая характеризует степень влияния различных погрешностей станков. Точность системы позиционирования (СП) является одной из наиболее показательных характеристик металлорежущих станков, позволяющих оценить точность обработанных на нем деталей. Цель нашего исследования - оптимизировать координаты зоны резания с целью повышения точности в станках. Изложены методы решения задач оптимизации координат зоны резания в станках с ЧПУ. По эпюре давлений в направляющих оптимизируются координаты зоны резания с целью повышения точности обработки.

**Ключевые слова:** точность, давление, смещение, оптимизация

---

### **Введение**

Качество обработки на металлорежущих станках непосредственно связано с его точностью, которая характеризует степень влияния различных погрешностей станков (геометрических, кинематических, упругих, температурных и динамических) на точность изготавливаемых деталей. При проектировании станков стремятся по возможности приблизить направляющие к рабочему пространству; при этом середина направляющих оказывается ближе к той или иной точке рабочего пространства, которая и может быть обозначена в формуле компоновки [1].

Точность системы позиционирования (СП) является одной из наиболее показательных характеристик металлорежущих станков, позволяющих оценить точность обработанных на нем деталей. Точность СП зависит от большого количества факторов, в числе основных – люфты в направляющих и передачах, несоосность осей и их неперпендикулярность, контактные деформации и др. Направляющие СП всегда были важнейшими составляющими конструкций. **Цель данного исследования** – по методике оптимизации эпюры давления направляющих металлорежущих станков повысить точность СП и обработки.

## Постановка задачи

Рабочее поле компоновки станка весьма информативно характеризует влияние СП на макрогеометрию поверхностей детали (или деталей), подлежащих обработке. Для повышения статической точности исследуемого станка принципиально возможна реализация двух групп мероприятий. Одна из них направлена на уменьшение опрокидывающих ползун моментов от составляющих силы резания и связана с целенаправленным изменением координат общего центра тяжести узлов группы ползуна. Другая группа мероприятий связана с изменением размеров граней направляющих, которое может сопровождаться и изменением их профиля [2].

В инженерной практике расчета и конструирования машин часто возникает необходимость определения давлений в направляющих станков с целью проверки работоспособности конструкции или увеличения ее долговечности. Аналитически такой расчет обычно проводится исходя из допущения абсолютной жесткости контактирующих тел. При этом установление наибольших давлений на каждой из рабочих граней направляющих представляет задачу статически неопределимую.

Между тем расчет прямолинейных направляющих можно представить как статически определимую задачу, допуская, что эпюра давлений ограничена прямой или плоскостью [4, 6]. Возможны 2 варианта эпюры давления: а – равномерное давление  $\rho_1 = \rho_2$ ; вариант б – неравномерное давление  $\rho_1 \neq \rho_2$  (рис. 1).

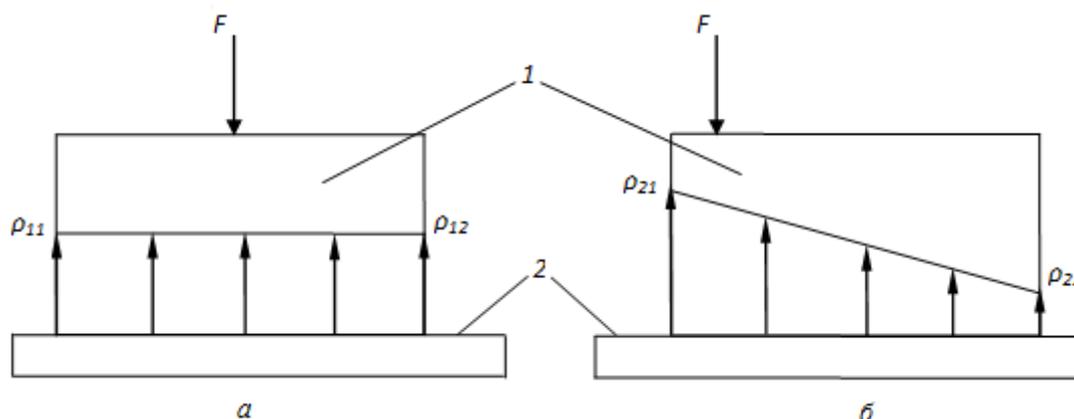


Рис. 1. Эпюры давления направляющих: а – равномерное; б – неравномерное; 1 – салазки, 2 – направляющие

Контактные смещения  $y$  и давления  $\rho$  связаны экспериментально установленными зависимостями, полученными для плоских стыков с малой площадью контакта:

$$y = c\rho^m, \quad (1)$$

где  $c$  и  $m$  – коэффициенты, зависящие от материала, шероховатости (макро- и микрогеометрии) и состояния контактных поверхностей.

Установим зависимость смещения  $y$  и погрешность  $\Delta$  деформаций направляющих.  
(рис. 1)

**Вариант а:**

$$\rho_{11} = \rho_{12} = \rho_{cp} = F/s, y_{11} = c\rho_{11}^m = c\rho_{12}^m = y_{12};$$

где  $s$  и  $\rho_{cp}$  – площадь и среднее давление направляющих.

Абсолютная и относительная погрешность:

$$\Delta_{a.ab.} = y_{a.max.} = y_{11} = c\rho_{cp}^m;$$

$$\Delta_{a.om.} = y_{11} - y_{12} = 0.$$

**Вариант б:**

$$\rho_{21} \neq \rho_{22}, \rho_{21} > \rho_{22}, (\rho_{21} + \rho_{22})/2 = \rho_{cp} = F/s, \rho_{21} > \rho_{cp} > \rho_{22};$$

$$y_{21} = c\rho_{21}^m, y_{22} = c\rho_{22}^m, c\rho_{21}^m > c\rho_{cp}^m > c\rho_{22}^m;$$

Абсолютная и относительная погрешность:

$$\Delta_{б.ab.} = y_{б.max.} = y_{21} = c\rho_{21}^m > c\rho_{cp}^m;$$

$$\Delta_{б.om.} = y_{21} - y_{22} = c\rho_{21}^m - c\rho_{22}^m > 0.$$

Из анализа двух вариантов следует, что при равномерном давлении погрешность направляющих минимальна.

В общем виде уравнение давления  $\rho$  для любой точки опорной поверхности прямолинейных направляющих будет иметь вид (рис. 2):

$$\rho = Ax + By + D, \quad (2)$$

где  $A, B, D$  – постоянные коэффициенты, характеризующие равномерность распределения давления по опорной поверхности;  $x, y$  – координаты направляющих салазок.

На рис. 2 по длине направляющих  $l$  выделена область расположения салазок 1 на прямолинейных направляющих 2. Начало координат совмещено с одним из углов салазок. На схеме приведены необходимые для расчета размеры, сосредоточенная сила  $F_z$ , сила тяжести  $G$ , моменты  $M_x, M_y$  и другие.

Для решения уравнения (2) составим три уравнения статики.

Сумма проекций внешних сил  $\sum F_z$  на ось  $Oz$  уравнивается суммой распределенных реактивных сил, спроектированных на ту же ось:

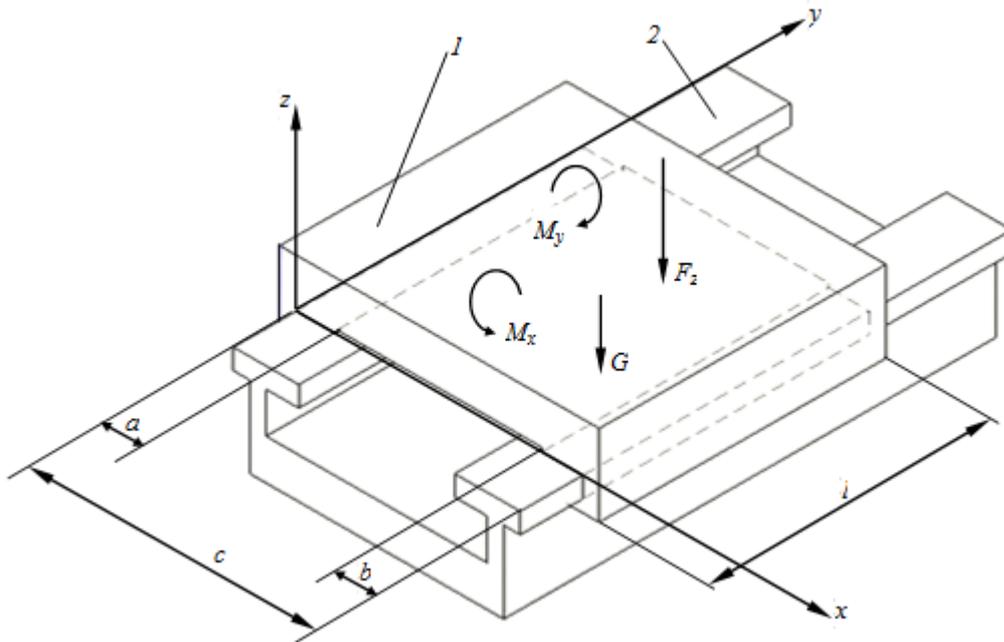
$$\sum F_z = \iint_s (Ax + By + z) d_x d_y. \quad (3)$$

Сумма моментов внешних сил  $\sum M_x$  относительно оси  $Ox$  уравнивается моментом распределенных реактивных сил относительно той же оси:

$$\sum M_x = \iint_s (Ax + By + z) y d_x d_y. \quad (4)$$

Сумма моментов внешних сил  $\sum M_y$  относительно оси  $Oy$  уравнивается моментом распределенных реактивных сил относительно той же оси:

$$\sum M_y = \iint_S (Ax + By + z)xd_xd_y. \quad (5)$$



**Рис. 2.** Схема расчета направляющих прямолинейного движения: 1 – салазки; 2 – прямолинейные направляющие

Расставив пределы интегрирования в уравнениях (3) – (5), после решения и преобразования получим выражения для постоянных коэффициентов:

$$\begin{cases} A = \frac{12d}{Ql} \left( -\frac{\sum F_z}{2d} + \sum M_y \right), \\ B = \frac{12}{dl^2} \left( -\frac{\sum F_z}{2} + \frac{\sum M_x}{l} \right), \\ D = \frac{1}{l} \left[ \frac{\sum F_z}{d} \left( 4 + \frac{3N^2}{Q} \right) - \frac{6\sum M_x}{dl} - \frac{6N\sum M_y}{Q} \right]; \end{cases}$$

где:

$$d = a + b; N = a^2 - b^2 + 2bc;$$

$$M = a^3 + b^3 + 3bc(c - b); Q = 4M(a + b) - 3N^2.$$

Подставив коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $D$  в уравнение (2), найдем формулы для определения давления в угловых точках опорной поверхности направляющих:

1) при  $x=0, y=0$ :

$$\rho_1 = D = \frac{1}{l} \left[ \frac{\sum F_z}{d} \left( 4 + \frac{3N^2}{Q} \right) - \frac{6\sum M_x}{dl} - \frac{6N\sum M_y}{Q} \right], \quad (6)$$

2) при  $x=c, y=0$ :

$$\rho_2 = Ac + D = \frac{12dc}{Ql} \left( -\frac{N\sum F_z}{2d} + \sum M_y \right) + \rho_1, \quad (7)$$

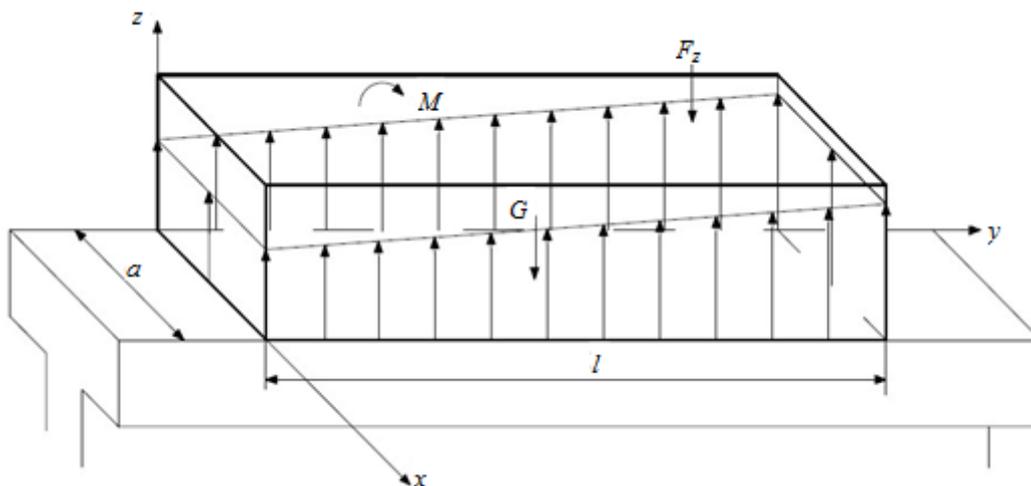
3) при  $x=0, y=l$ :

$$\rho_3 = Bl + D = \frac{12}{dl} \left( -\frac{\sum F_z}{2} + \frac{\sum M_x}{l} \right) + \rho_1, \quad (8)$$

4) при  $x=c, y=l$ :

$$\rho_4 = \rho_2 + \rho_3 - \rho_1. \quad (9)$$

**А.** При малой ширине опорных поверхностей (узких направляющих), давление по ширине можно принять постоянным, и расчет упростится. Расчетная схема для этого случая показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Схема расчета узких прямолинейных направляющих

Для упрощения расчетов давления, учитывая также, что:

$$\sum M_y = F_z \cdot \frac{a}{2}, \quad \sum M_x = F_z \cdot y_z,$$

$$x = c = a = \text{const}, \quad b = 0; \quad d = a, \quad N = a^2, \quad M = a^3, \quad Q = a^4,$$

где  $y_z$  – координата силы  $F_z$  по оси  $oy$ .

Подставив полученные данные в формулы (5) – (8), получим уравнения для расчета давления узких направляющих:

для левого конца направляющих ( $y=0$ ):

$$\rho_0 = \frac{F_z}{al^2}(4l - 6y_z);$$

для правого конца направляющих ( $y=l$ ):

$$\rho_l = \frac{F_z}{al^2}(-2l + 6y_z).$$

1. Принимая  $y_z = 0$  или  $y_z = l$ , находим максимальное и минимальное давление  $\rho_A$ , и максимальную абсолютную и относительную погрешность  $\Delta_A$ :

$$\rho_{A.\max} = \frac{4F_z}{al}, \rho_{A.\min} = -\frac{2F_z}{al},$$

$$\Delta_{A.\text{аб.}} = c\rho_{A.\max}^m = c\left(\frac{4F_z}{al}\right)^m,$$

$$\Delta_{A.\text{от.}} = c\rho_{A.\max}^m - c\rho_{A.\min}^m = c\left(\frac{4F_z}{al}\right)^m + c\left(\frac{2F_z}{al}\right)^m.$$

2. Принимая  $y_z = l/2$ , находим равномерное давление, и минимальную абсолютную и относительную погрешность:

$$\rho_A \equiv \frac{F_z}{al},$$

$$\Delta_{A.\text{аб.}} = c\rho_{A.\max}^m = c\left(\frac{F_z}{al}\right)^m,$$

$$\Delta_{A.\text{от.}} = c\rho_{A.\max}^m - c\rho_{A.\min}^m = 0.$$

Для узких направляющих, когда внешняя сила приложена в середине, получим равномерную эпюру и самую маленькую погрешность.

При изменении координаты силы  $F_z$  от  $y_z = 0$  до  $y_z = l$  давление по длине определяется по зависимости:

$$\rho_A = \frac{12F_z}{al^3}(y_z^2 - ly_z + \frac{l^2}{3}).$$

Эпюра давления по длине направляющих показана на рис. 4.

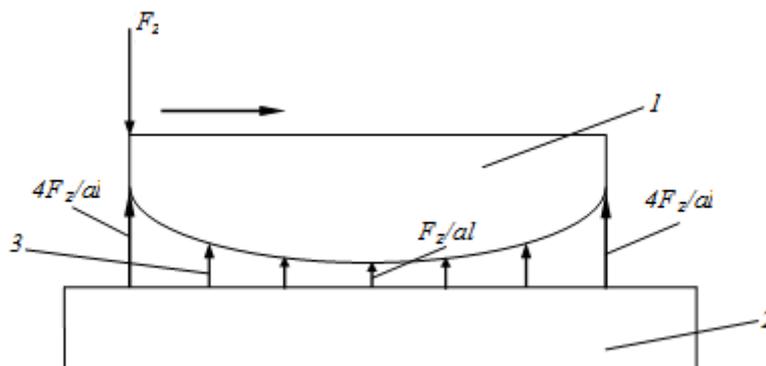


Рис. 4. Эпюра давления по длине направляющих: 1—салазки, 2 – направляющие, 3 – эпюра давления

Б. Опорная поверхность непрерывна, но давление по длине и ширине ее принимается переменным. Следовательно, при принятых обозначениях по рис. 2,

$$a = c, b = 0, d = a:$$

$$N = a^2, M = a^3, Q = a^4.$$

Для упрощения расчетов принимаем только внешнюю силу  $F_z$ , то:

$$\sum F_z = F_z;$$

$$\sum M_x = F_z \cdot y, 0 \leq y \leq l;$$

$$\sum M_y = F_z \cdot x, 0 \leq x \leq a;$$

где  $(x, y)$  – координаты внешней силы  $F_z$ .

Тогда расчетные формулы (6) – (9) примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 = \frac{F_z}{a^2 l^2} (7al - 6ay - 6lx), \\ \rho_2 = \frac{F_z}{a^2 l^2} (al - 6ay + 6lx), \\ \rho_3 = \frac{F_z}{a^2 l^2} (al + 6ay - 6lx), \\ \rho_4 = \frac{F_z}{a^2 l^2} (-5al + 6ay + 6lx). \end{array} \right.$$

1. Принимая  $x=0$  или  $x=a$ , и  $y=0$  или  $y=l$ , находим максимальное и минимальное давление  $\rho_B$ , и максимальную абсолютную и относительную погрешность  $\Delta_B$ :

$$\rho_{B.max} = \frac{7F_z}{al}, \rho_{B.min} = -\frac{5F_z}{al},$$

$$\Delta_{B.аб.} = c\rho_{B.max}^m = c\left(\frac{7F_z}{al}\right)^m,$$

$$\Delta_{B.от.} = c\rho_{B.max}^m - c\rho_{B.min}^m = c\left(\frac{7F_z}{al}\right)^m + c\left(\frac{5F_z}{al}\right)^m.$$

2. Принимая  $x=a/2$  и  $y=l/2$ , находим равномерное давление, и минимальную абсолютную и относительную погрешность направляющих:

$$\rho_B \equiv \frac{F_z}{al},$$

$$\Delta_{B.аб.} = c\rho_{B.max}^m = c\left(\frac{F_z}{al}\right)^m,$$

$$\Delta_{B.от.} = c\rho_{B.max}^m - c\rho_{B.min}^m = 0.$$

Для этих направляющих, когда внешняя сила приложена в середине, тоже получим равномерную эпюру и минимальную погрешность.

Давление в каждой точке поверхности направляющих от силы резания  $F_z$  определяется по зависимости:

$$\rho_B = \frac{F_z}{al} \left[ \frac{12}{a^2} \left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \frac{12}{l^2} \left( y - \frac{l}{2} \right)^2 + 1 \right].$$

В вариантах **A** и **B** оптимизацию давлений направляющих можно получить изменением размеров салазок, величины и координаты приложенных сил.

### Выводы

1. При равномерной эпюре давлений направляющих обеспечивается наиболее высокая точность СП металлорежущих станков.
2. Давление на опорной поверхности целесообразно определять изложенной методикой.
3. Основные факторы воздействия на выравнивании давлений – изменение размеров конструкций и векторов приложенных сил.

### Список литературы

1. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.
2. Ершов А.А. Влияние контактных характеристик соединений корпусных деталей на показатели статической точности станков: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2001. 131 с.
3. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
4. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
5. Чернянский П.М. Основы проектирования точных станков: теория и расчет. М.: КНОРУС, 2010. 240 с.
6. Проектирование автоматизированных станков и комплексов. В 2 т. Т. 1 / ред. П.М. Чернянского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 331 с.

## Technique for Increasing Accuracy of Positioning System of Machine Tools

Sh. Ji<sup>1,\*</sup>, P.M. Chernyansky<sup>1</sup>

[\\*jisc1988@sina.com](mailto:jisc1988@sina.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** accuracy, pressure, displacement, optimization

---

The aim of research is to improve the accuracy of positioning and processing system using a technique for optimization of pressure diagrams of guides in machine tools. The machining quality is directly related to its accuracy, which characterizes an impact degree of various errors of machines. The accuracy of the positioning system is one of the most significant machining characteristics, which allow accuracy evaluation of processed parts.

The literature describes that the working area of the machine layout is rather informative to characterize the effect of the positioning system on the macro-geometry of the part surfaces to be processed. To enhance the static accuracy of the studied machine, in principle, two groups of measures are possible. One of them points toward a decrease of the cutting force component, which overturns the slider moments. Another group of measures is related to the changing sizes of the guide facets, which may lead to their profile change.

The study was based on mathematical modeling and optimization of the cutting zone coordinates. And we find the formula to determine the surface pressure of the guides. The selected parameters of optimization are vectors of the cutting force and values of slides and guides. Obtained results show that a technique for optimization of coordinates in the cutting zone was necessary to increase a processing accuracy.

The research has established that to define the optimal coordinates of the cutting zone we have to change the sizes of slides, value and coordinates of applied forces, reaching the pressure equalization and improving the accuracy of positioning system of machine tools. In different points of the workspace a vector of forces is applied, pressure diagrams are found, which take into account the changes in the parameters of positioning system, and the pressure diagram equalization to provide the most accuracy of machine tools is achieved.

### References

1. Vragov Yu.D. *Analiz komponovok metallovezhushchikh stankov* [Analysis of machining configurations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p. (in Russian).

2. Ershov A.A. *Vliyanie kontaktnykh kharakteristik soedineniy korpusnykh detaley na pokazateli staticheskoy tochnosti stankov. Kand. dis.* [Influence of the contact characteristics of compounds of case details on indicators of the machining static accuracy. Cand. dis.]. Nizhniy Novgorod, 2001. 131 p. (in Russian).
3. Aver'yanov O.I. *Modul'nyy printsip postroeniya stankov s ChPU* [The modular principle of CNC machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 232 p. (in Russian).
4. Levina Z.M., Reshetov D.N. *Kontakt'naya zhestkost' mashin* [Contact stiffness of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 264 p. (in Russian).
5. Chernyanskiy P.M. *Osnovy proektirovaniya tochnykh stankov: teoriya i raschet* [Basics of designing precise machines: theory and calculation]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 240 p. (in Russian).
6. Chernyanskiy P.M. *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov. V 2 t. T. 1* [Design of automated machines and systems. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 331 p. (in Russian).