

УДК 621.01
На правах рукописи

Цзи Шоучэн

**Оптимизация компоновок металлорежущих станков на основе
расчета эпюры давлений на поверхности направляющих**

Специальности:

05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

Автореферат
Диссертации на соискание ученой степени
Кандидата технических наук

Цзи Шоучэн

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Утенков Владимир Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Металлорежущие станки»

Официальные оппоненты: **Молодцов Владимир Владимирович**,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Станки» ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет «СТАНКИН»

Алешин Александр Константинович,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник отдела
механики машин и управления машинами ФГБУН
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет»

Защита состоится «__» _____ 2018 г. в __ час. __ мин. на заседании диссертационного совета _____ при «МГТУ им. Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5, стр. 1 и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: 8(499)267-09-63.

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Компоновка станков имеет блочную структуру и состоит из одного стационарного и нескольких подвижных блоков, разделенных линейными или круговыми направляющими. Каждый подвижный блок выполняет определенное координатное движение. Число направляющих равно или несколько меньше числа элементарных движений, предусмотренных кинематической структурой станка.

Обработка на станках основана на относительном перемещении обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Каждая конкретная модель металлорежущего станка имеет точно определенную зону возможных пространственных положений режущего инструмента или другими словами полную рабочую зону резания (ПРЗР). Точность обработки в ПРЗР металлорежущих станков неравномерна. Наиболее резко ухудшаются условия обработки деталей, когда возникает раскрытие стыка в направляющих (эпюра давлений в гранях направляющих распределяется не по всей их длине и ширине). При этом определение параметров компоновки станка, обеспечивающих возможность работы без раскрытия стыков в направляющих для наибольшей номенклатуры обрабатываемых деталей, с учетом постоянно нарастающих требований к точности станков, является задачей безусловно актуальной.

Степень научной разработанности темы исследования.

Основополагающие исследования, посвященные анализу влияния компоновки станков на их работоспособность, содержатся в работах Врагова Ю.Д., Решетова Д.Н., Левиной З.М., Каминской В.В. и др. Обобщение опыта использования в станкостроении методов оптимизации параметров компоновок станков изложено в работах Проникова А.С.. В работах Чернянского П.М. впервые была изложена гипотеза о возможности оптимизации конструкции токарных станков на основе выбора параметров их компоновки, обеспечивающих наибольшую площадь активной рабочей зоны резания (АРЗР). Если суппорт находится в АРЗР, то в его направляющих не возникает раскрытия стыка. Раскрытие стыка приводит к скачкообразному изменению площади фактического касания в направляющих, и, как результат, резкому изменению жесткости несущей системы станка, что, как показано в работе, является абсолютно недопустимым.

Цель работы. Разработка методики автоматизированного определения и оптимизации параметров компоновки станков, при которых АРЗР имеет наибольшую площадь, в пределах которой не происходит раскрытия стыков в направляющих.

В качестве целевой функцией оптимизации принимаем максимальное значение коэффициента η , равное отношению площади АРЗР S_A к площади ПРЗР S_{Π} .

Основные задачи исследования:

1. Оптимизация параметров компоновки конкретных моделей металлорежущих станков.
2. Разработка алгоритмов особо быстрого математического моделирова-

ния процесса в контакте направляющих скольжения с оценкой параметров эпюр давления.

3. Разработка универсального программного комплекса оптимизации конструкции металлорежущего станка, реализующего разработанные алгоритмы с возможностью решения системы сил и реакций в направляющих по уравнениям статики 7-ю с 9-ю неизвестными.

4. **Научная новизна исследования** заключается в постановке и решении актуальной задачи оптимизации конструкции металлорежущих станков, при этом установлена возможность существенного увеличения АРЗР, где не происходит раскрытия стыков в направляющих.

5. **Теоретическая значимость работы** заключается в разработке научного подхода к многопараметрической оптимизации конструкции металлорежущих станков по впервые предложенной и использованной целевой функции.

6. **Практическая значимость работы** заключается в разработке и принятию к внедрению рекомендаций по изменению параметров конструкции изготавливаемых в настоящее время в ООО «Коломнаспецстанок» токарных станков модели 16КС20-01-L и в разработке комплекса программных средств, для выполнения расчетов по поиску параметров конструкций токарных и фрезерных станков с достижением максимума целевой функции.

Методы исследования и достоверность. Для решения поставленных задач использовались современные методы математического моделирования для расчета эпюры давления в направляющих скольжения токарных станков. Задача определения параметров конструкции станков решена на основе многопараметрической оптимизации с использованием методики генетических алгоритмов (ГА). Достоверность разработанных программ математического моделирования и расчетные алгоритмы были проверены на примерах тестовых функций Растригина, Шекеля, Химмельблау и Розенброка.

Результаты, полученные автором и выносимые на защиту:

1. Методика и алгоритмы оптимизации параметров конструкции токарных станков, обеспечивающие максимальную площадь зоны резания, при отсутствии раскрытия стыка в направляющих.

2. Доказательство достоверности разработанных алгоритмов математического моделирования на основе решения тестовых функций.

3. Оценка эффективности оптимизации параметров конструкции токарных станков на основе сравнения характеристик находящейся в эксплуатации модели 16К20Т1 и изготавливаемой в настоящее время модели 16КС20-01-L.

4. Установленные зависимости целевой функции оптимизации – максимального значения коэффициента η , равного отношению площади АРЗР S_A к площади ПРЗР S_{II} , как функции варьируемых параметров конструкции станков.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 3-х всероссийских научно-технических конференциях «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2014 г. – 2016 г.).

Выполнение основных разделов диссертации было рассмотрено в МГТУ им. Н.Э. Баумана на научных семинарах кафедры «Металлорежущие станки».

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы опубликованы в 6 научных работах, из них 3 – в журналах из перечня ВАК РФ, рекомендованного для опубликования результатов диссертационных работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы, и предложения. Общий объем работы составляет 106 страниц, в том числе 38 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задачи и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе приведены сведения о последствиях раскрытия стыка в направляющих металлорежущих станков. В работе профессора Решетов Д.Н. и Левина З.М. привели схему раскрытия стыка в направляющих токарного станка (Рис.1). Под действием крутящего момента от внешних сил M_z эпюра давления (заштрихована) может распределяться по всей длине L направляющей (Рис.1, б), или на ее части – длине L_k . Момент времени, когда $L = L_k$ определяет начало раскрытия стыка.

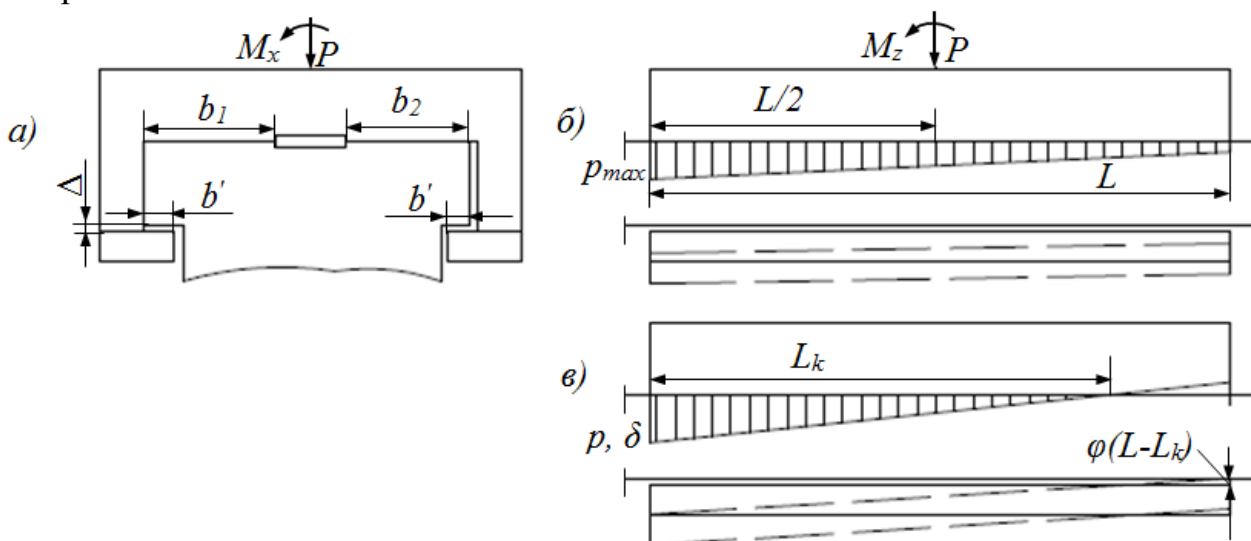


Рис. 1. Схема к расчету упругих перемещений в продольной плоскости направляющих токарного станка (заштрихованные области – эпюры давлений)

Для второго варианта (Рис.1, в), условия равновесия и совместности перемещений имеют вид:

$$P = \frac{p(b_1 + b_2)L_k}{2}; M_z = P\left(\frac{L}{2} - \frac{L_k}{3}\right); \varphi_z = \frac{kp}{L_k};$$

Откуда: $\frac{L}{L_k} = 3 \cdot (0.5 - \frac{M_z}{PL})$; L_k – длина направляющих, участвующая в работе.

После преобразований угол поворота салазок (обратно пропорционален жесткости J , $J=M/\varphi_z$):

$$\varphi_z = \frac{12M_z k c_\varphi}{(b_1 + b_2)L^3}; \quad c_\varphi = \frac{1}{13.5 \cdot \frac{M_z}{PL} (1 - \frac{2M_z}{PL})^2};$$

где: c_φ – коэффициент, учитывающий распределение давлений не по всей длине направляющих. Значения c_φ показаны на Рис. 2 штриховой линией.

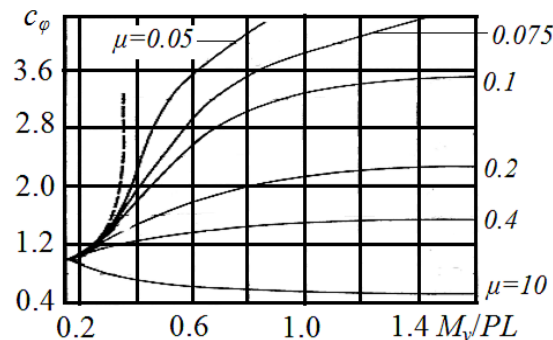


Рис. 2. График для определения коэффициента c_φ , (μ – коэффициент, зависящий от соотношения ширины вспомогательных и основных граней)

Таким образом, в момент раскрытия стыка, упругая система станка (УСС) за счет резкого уменьшения жесткости стыка суппорт – станина (что объясняется мгновенным сокращением площади фактического контакта в данном стыке) переходит в новое состояние, в котором станок теряет работоспособность.

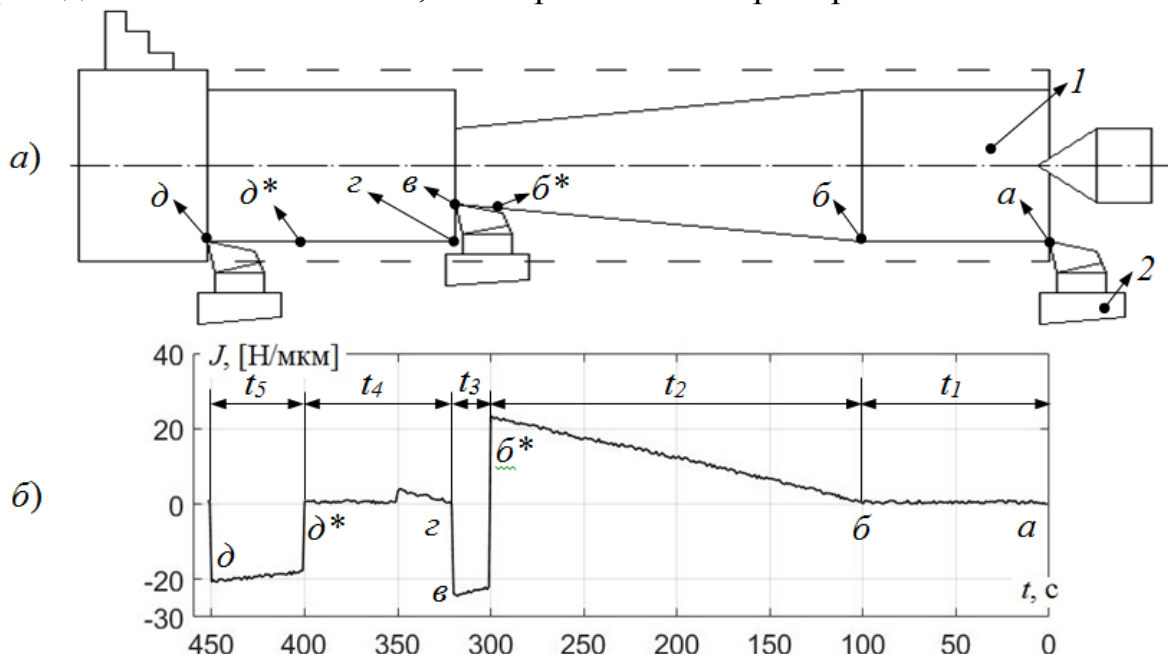


Рис. 3. Схема обработки заготовки в токарном станке:

а) последовательность процесса резания (1 – заготовка; 2 – инструмент); б) изменение жесткости стыка суппорт – станина в процессе обработки (точки а – д соответствуют обейм частям рисунка)

На Рис. 3 показан пример изменения жесткости стыка суппорт – станина при выполнении конкретной технологической операции токарной обработки.

Переход УСС в новое состояние естественно сопровождается изменением статической и динамической жесткости, что при черновой обработке может привести к потере устойчивости (появлению автоколебаний) со всеми вытекающими последствиями (поломка инструмента, порча заготовки и т.д.), а при чистовой обработке – к дополнительной погрешности размера и формы детали, повышению шероховатости.

Для определения АРЗР в станках необходимо рассчитать эпюру давления в направляющих. С целью автоматизации расчета давлений был предложен алгоритм расчета реакций в направляющих, который во многом опирается на работы в области моделирования УСС, выполненные в 90-е годы прошлого века в ЭНИМСе (под руководством профессора В.В. Каминской) и в МГТУ «Станкин» (под руководством профессора Хомякова В.С.).

Пример расчетной схемы металлорежущего станка с ЧПУ показан на Рис.4. Глобальная система координат (ГСК) станка располагается в точке «0», которая соответствует пересечению плоскости переднего торца шпинделя с его осью. В ГСК с каждым суппортом связывается локальная система координат (ЛСК), начало которой располагается в центре тяжести салазок, ось «X» направлена по направлению движения салазок, а ось «Z» перпендикулярно плоскости направляющих.

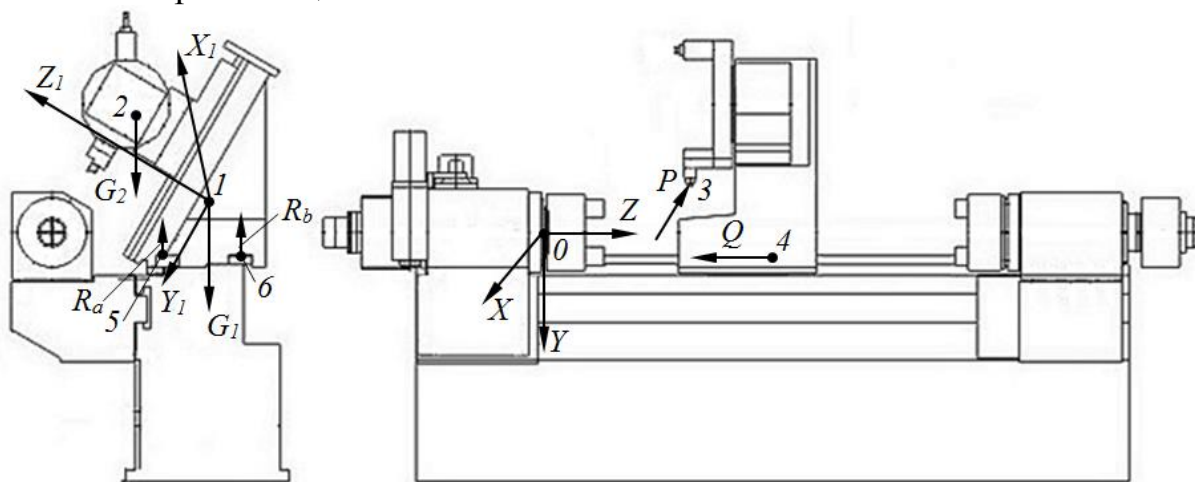


Рис. 4. Расчетная схема для определения эпюры давления в направляющих токарного станка с ЧПУ

На Рис. 4 показана точка сил: «1» – центр тяжести ползуна, G_1 – сила ползуна; «2» – центр тяжести револьверной головки, G_2 – сила тяжести револьверной головки с инструментами; «3» – точка приложения силы резания, $P(P_x, P_y, P_z)$; «4» – точка приложения силы тяги Q ; также точки 5, 6 – точки приложения сил реакций в передней R_a и задней направляющих R_b .

В ГСК с каждым суппортом связывается локальная система координат (ЛСК), начало которой располагается в центре тяжести ползуна, ось «X» направлена по направлению движения салазок, а ось «Z» перпендикулярно плоскости направляющих.

На расчетной схеме отмечаются точки: начала ЛСК, приложения силы резания, силы тяжести, силы тяги и силы реакции. Координаты этих точек в ГСК и составляющие приложенных сил в них записываются в Таблицу 1, а в Таблицу 2 записываются углы поворота осей ЛКС относительно ГСК.

Таблица 1.

Координаты точек и внешние силы

Номер точки	Координаты в ГСК, мм			Силы в ГСК, Н		
	x	y	z	F _x	F _y	F _z
1	x _{G1}	y _{G1}	z _{G1}	0	G ₁	0
2	x _{G2}	y _{G2}	z _{G2}	0	G ₂	0
3	x _P	y _P	z _P	P _x	P _y	P _z
4	x _Q	y _Q	z _Q	0	0	Q
5	x _a	y _a	z _a	0	R _a	0
6	x _b	y _b	z _b	0	R _b	0

Таблица 2.

Положение ЛСК в ГСК

ЛСК к ГСК	Угол, градус
Ось X ₁	$\alpha_{x1x}, \alpha_{x1y}, \alpha_{x1z}$
Ось Y ₁	$\beta_{y1x}, \beta_{y1y}, \beta_{y1z}$
Ось Z ₁	$\gamma_{z1x}, \gamma_{z1y}, \gamma_{z1z}$

По информации из Таблицы 1 и 2 выполняется преобразование координат точек приложения сил из ГСК в ЛКС. Это преобразование осуществляется с помощью соответствующей матрицы. Например, матрица преобразования координат точки $k(x_k, y_k, z_k)$ из ГСК в соответствующие координаты i -й ЛСК $k_i(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik})$, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{oi} & y_{oi} & z_{oi} & 1 \\ [S_i]_{3 \times 3} & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ z_{ki} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad [S_i]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{x_i x} & \cos \alpha_{x_i y} & \cos \alpha_{x_i z} \\ \cos \beta_{x_i x} & \cos \beta_{x_i y} & \cos \beta_{x_i z} \\ \cos \gamma_{x_i x} & \cos \gamma_{x_i y} & \cos \gamma_{x_i z} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

где: $[S_i]$ – матрица направляющих косинусов, состоящая из косинусов углов задающих положения ЛСК в ГСК.

Далее следует перенос всех сил в точку начала i -й ЛСК. Например, перенос вектора силы $\{D_k\}$ из точки k ГСК осуществляется следующим образом:

$$\{D_{ki}\} = [T_{ik}]^T \cdot \{D_k\}, \quad (2)$$

где: $\{D_k\}$ – вектор силовых факторов с размерностью 6-1; матрица переноса $[T_{ik}]$ имеет вид:

$$T_{ik} = \begin{bmatrix} I & \Delta_k \\ 0 & I \end{bmatrix}_{6 \times 6};$$

где: $I = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}; \Delta_k = \begin{bmatrix} 0 & z_k - z_{ki} & y_{ki} - y_i \\ z_{ki} - z_i & 0 & x_i - x_{ki} \\ y_i - y_{ki} & x_{ki} - x_i & 0 \end{bmatrix}.$

Задача сводится к решению векторного уравнения:

$$\{F\} + \{R\} = 0; \quad (3)$$

где: $\{F\}$ – суммарный вектор всех статических внешних силовых факторов (силы резания, сила тяги, силы тяжести, приложенных в соответствующих точках), размерностью 6×1 , $\{F\} = \{F_x, F_y, F_z, M_{F_x}, M_{F_y}, M_{F_z}\}^T$; $\{R\}$ – суммарный вектор всех реакций, размерностью 6×1 , $\{R\} = \{R_x, R_y, R_z, M_{R_x}, M_{R_y}, M_{R_z}\}^T$.

Для токарного станка модели 16K20T1, на примере которого выполнена процедура оптимизации параметров конструкции, составлена расчетная схема, приведенная на Рис. 5.

При перемещении суппорта (или стола) по направляющим станины на него действуют силы резания (P_x, P_y, P_z), сила тяги Q , перемещающая суппорт, и сила веса суппорта G . В результате действий этих внешних сил в направляющих возникают реакции, которые и определяют эпюру давлений.

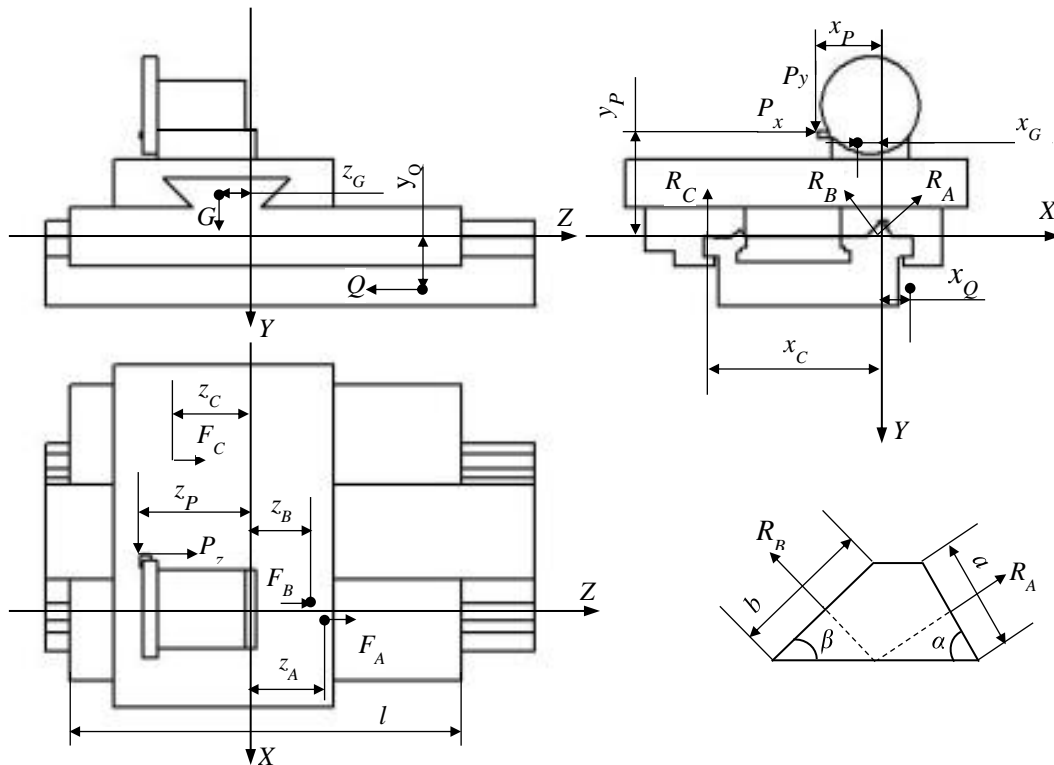


Рис. 5. Расчетная схема для определения реакций в направляющих станка мод. 16K20T1

Для этой модели токарного станка имеем:

$$\{F\} = \sum [T_{kn}] \cdot \{F_k\} = \left\{ \begin{array}{l} P_x, \\ P_y + G, \\ P_z + Q, \\ P_z \cdot y_p + Q \cdot y_Q - P_y \cdot z_p - G \cdot z_G, \\ P_z \cdot x_p - P_x \cdot z_p + Q \cdot x_Q, \\ P_x \cdot y_p - G \cdot x_G - P_y \cdot x_p \end{array} \right\}; \quad (4)$$

$$\{R\} = \sum [T_{vn}] \cdot \{R_v\} = \left\{ \begin{array}{l} R_A \sin \alpha - R_B \sin \beta, \\ -(R_B \cos \beta + R_A \cos \alpha + R_C), \\ f(R_A + R_B + R_C), \\ R_C \cdot z_c + R_B \cos \beta \cdot z_B + R_A \cos \alpha \cdot z_A, \\ R_C f \cdot x_c + Q \cdot x_Q + R_B \sin \beta \cdot z_B - R_A \sin \alpha \cdot z_A, \\ R_C \cdot x_c \end{array} \right\}. \quad (5)$$

где: f – коэффициент трения в направляющих.

В исследованиях профессоров Решетова Д.Н., Проникова А.С., Утенкова В.М. использовалась упрощенная методика, основанная на решении системы уравнений сил и их моментов, действующих на подвижный рабочий орган станка при резании. При этом для токарного станка мод. 16К20Т1 (Рис. 4) при определении эпюры давлений в направляющих оси координат совпадают с направляющими сил резания, начало координат выбрано в точке пересечения реакций на треугольной направляющей ($\alpha=55^\circ$ – угол направляющих A и оси X ; $\beta=45^\circ$ – угол направляющих B и оси X).

В ходе данной работы были выполнены расчеты этими двумя способами с полным соответствием полученных результатов.

При смещении реакции R от середины на величину x_A , при линейной эпюре давлений значение наибольшего p_1 и наименьшего p_2 давлений можно подсчитать по формулам:

$$p_1 = \frac{R}{al_0} (1 + 6 \frac{x_A}{l_0}), \quad p_2 = \frac{R}{al_0} (1 - 6 \frac{x_A}{l_0}); \quad (6)$$

где: a – ширина, l_0 – длина направляющих.

В общем виде эпюра давлений имеет вид трапеции. При $x_A = 0$, т.е. при приложении силы в центре направляющих, $p_1 = p_2 = A/al_0 = p_{cp} = const$, т. е. получим прямоугольную эпюру. При $x_A = l_0/6$, $p_2 = 0$ и $p_1 = 2p_{cp}$ – эпюра давлений треугольная.

При расчете треугольной направляющей определяют ее приведенную ширину. Для достаточно жестких салазок и направляющих, нагруженных относительно равномерно, считают, что опрокидывающий момент распределяется между гранями передней и задней направляющих пропорционально их ширине.

Приведенный методический подход позволяет определить условия нераскрытия стыка в направляющих по длине (система уравнений статики с 7-ю не-

известными).

Более сложной задачей является задача определения условий нераскрытия стыка как по длине, так и по ширине направляющих (система уравнений статики с 9-ю неизвестными). При этом требуется использование методического подхода, примененного в работах профессора Чернянского П.М., который основан на предположении о том, что форму эпюры давления в плоских направляющих прямолинейного движения (Рис. 6) всегда можно определить по следующей зависимости:

$$p = Ax + Bz + D, \quad (7)$$

где: A, B, D – постоянные коэффициенты, характеризующие равномерность распределения давления по опорной поверхности; x, z – координаты в поверхностях направляющих. То есть эпюры давления в передней и задней направляющей ограничиваются одной и той же плоскостью.

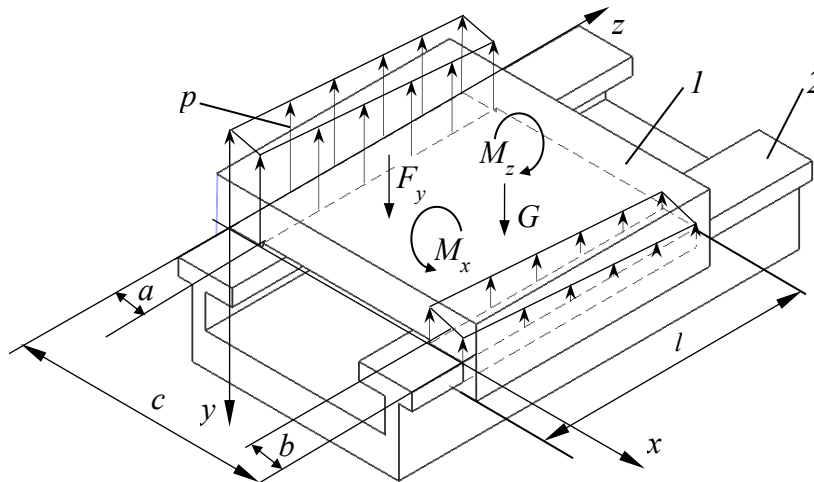


Рис. 6. Схема расчета направляющих прямолинейного движения:
 p – давления; 1 – суппорта; 2 – прямолинейные направляющие

При этом уравнения статики для суммы проекций внешних сил $\sum F_y$ и суммы моментов внешних сил $\sum M_x$ и $\sum M_z$ определяется по формулам:

$$\begin{cases} \sum F_y = \iint_{XZ} (Ax + Bz + D) d_x d_z; \\ \sum M_x = \iint_{XZ} (Ax + Bz + D) z d_x d_z; \\ \sum M_z = \iint_{XZ} (Ax + Bz + D) x d_x d_z. \end{cases} \quad (8)$$

где: X, Z – пределы координат на поверхности направляющих.

Во второй главе для компоновки станка модели 16K20T1 приведены последовательность и результаты расчета площади АРЗР, целевой функции η и максимального диаметра D обрабатываемых деталей станка, при которых не возникает раскрытия стыка в направляющих.

Показана необходимость использования для поиска глобальной экстре-

мумой целевой функции современных алгоритмов автоматизации расчетного процесса, каким является методика ГА.

На Рис. 7 приведены результаты расчета АРЗР, коэффициента η и максимального диаметра D обрабатываемых деталей для конструкции станка 16K20T1 по рассмотренным в первой главе реферата методикам. На Рис. 7, а, б и в – результаты для нераскрывающегося стыка только по длине направляющих (получены абсолютно одинаковые результаты при использовании всех трех указанных методических подходов). На Рис. 7, г – результаты полученные при расчете по методике профессора Чернянского П.М. для нераскрытия стыка как по длине, так и по ширине граней направляющих.

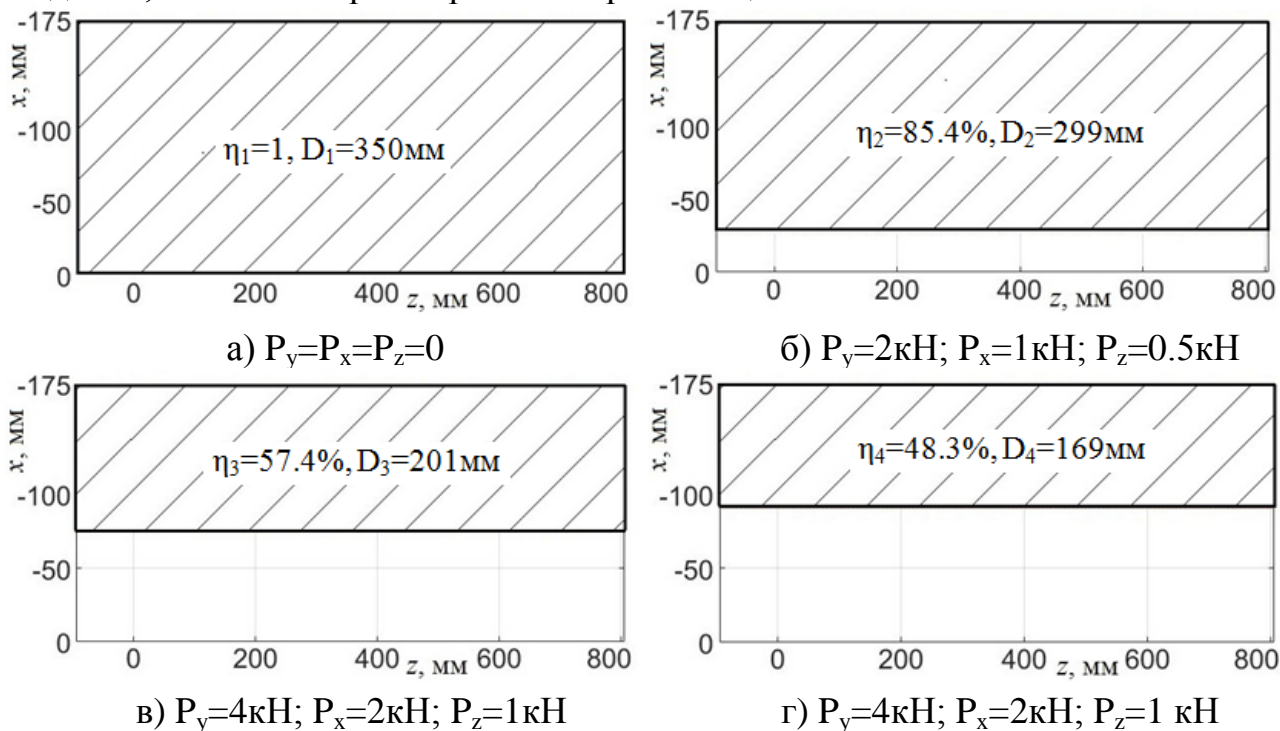


Рис. 7. Площадь АРЗР, коэффициент η и максимальный диаметр D обрабатываемых деталей (площадь АРЗР – заштрихованная область а, б, в и г)

Поиск возможности увеличения АРЗР определяется возможностью изменения параметров конструкции базовой модели станка. Для поиска экстремума целевой функции изменялись такие параметры компоновки станка как положение вектора силы резания (координаты (y_p, z_p) вершины резца в координатной системе направляющих), сила G и положение центра тяжести суппорта (x_G, z_G) , координаты точки приложения силы от привода подачи (x_Q, y_Q) , расстояние между направляющими x_C и длина l суппорта.

Сложные решения задачи параметрической оптимизации вынуждают ученых и исследователей обращаться к новым методам, в том числе к методам искусственного интеллекта, одной из разновидностью которых является метод ГА. В применении методики ГА для решения различного рода оптимизационных задач большой вклад внесли Вороновский Г.К., Сергеев С.А., Рутковская Д., Смирнов Н.И., Репин А.И. и др. Популяцию эволюционного подхода ГА можно анализировать, дополнять и видоизменять применительно к изменяющимся условиям, которые не требуются полный перебор. Определение макси-

мального экстремума целевой функции η выполнено с помощью методики моделирования по ГА.

Согласно стратегии генетических алгоритмов, первый набор (популяция, поколение) решений-кандидатов системы оптимизации создается случайно. Решения представлены в форме строк (хромосом), состоящих из последовательности двоичных разрядов. Каждая битовая строка разделена на сегменты, число которых равняется числу оптимизируемых параметров. Сконструированная таким образом двоичная строка существенно расширяет возможность получить решение в многомерном пространстве поиска. Качество каждого решения в популяции определяется используемым предопределенным критерием годности. После оценки приспособленности всех хромосом в популяции, создается новое поколение особей (индивидуумов) с использованием трех генетических операторов: селекции, кроссинговера и мутации.

Селекция – операция для отбора особей в новую популяцию. Действие оператора кроссинговера приводит к созданию двух потомков родительской пары. Вероятность кроссинговера самая высокая среди генетических операторов и равна и более 60%. Оператор мутации создает новые строки посредством случайного обмена (мутации) битов строк-потомков. Данный оператор необходим для "выбивания" популяции из локального экстремума и способствует защите от преждевременной сходимости.

Схема определения экстремума целевой функции по методике ГА показана на Рис. 8.

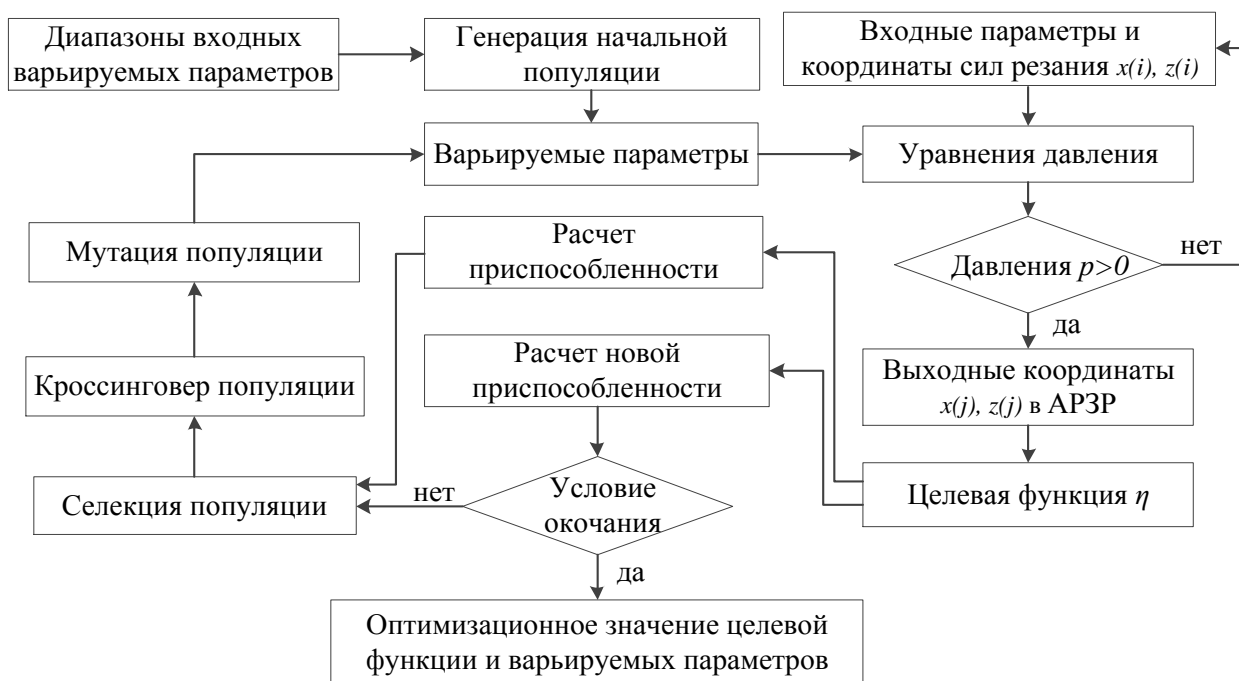


Рис. 8. Методика оптимизации ГА для токарного станка

Методика оценки экстремума целевой функции η данной задачи с использованием ГА имеет два процесса: получение выходных коэффициентов η по системе уравнений и экстремальной оптимизации ГА. Варьируемые параметры компоновки станка определяют входные популяции ГА. Определена генерация

начальной популяции ГА из входных диапазонов. Значение целевой функции η – выходная приспособленность ГА.

Для достаточно точной оценки экстремума целевой функции объем популяции варьируемых параметров выбран 1000 при 100 поколений эволюции. Диапазоны варьируемых параметров и параметры моделирования ГА показаны в Таблице 3.

Таблица 3.

Варьируемые параметры и параметры моделирования ГА

Варьируемые параметры	диапазон	Параметры моделирования ГА	величина
Координата y_p силы резания	(-240, -180)	Шаг перемещения суппорта	0.01
Координата z_p силы резания	(-150, 0)	Поколения эволюции	100
Величина силы тяжести G	(3000, 4000)	Объем популяции	1000
Координата x_G силы тяжести	(-80, 20)	Вероятность кроссинговера	0.7
Координата z_G силы тяжести	(-70, 20)	Вероятность мутации	0.1
координата x_Q силы тяги	(30, 80)		
координата y_Q силы тяги	(70, 140)		
Расстояние между направляющими суппорта x_C	(-400, -300)		
Длина суппорта l	(500, 700)		

На Рис. 9 показаны результаты выполненных расчетов для параметров конструкции токарных станков мод. 15K20T1.

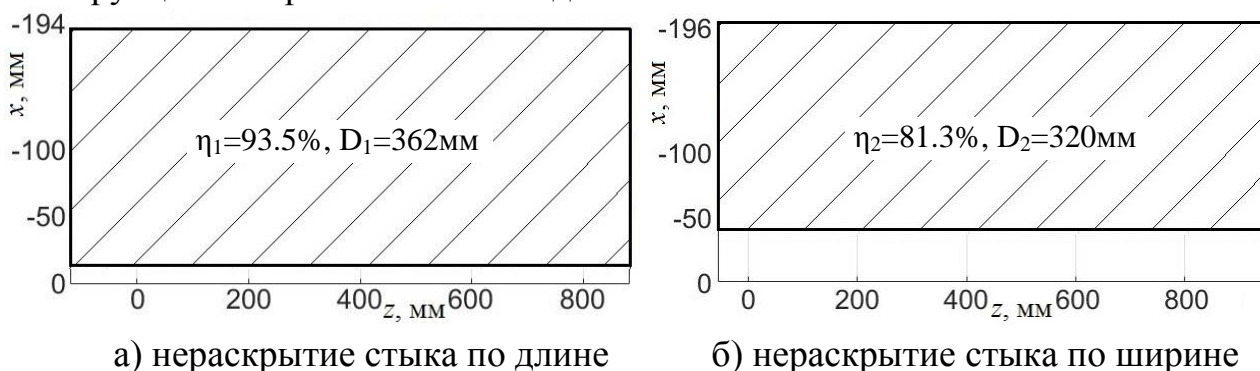


Рис. 9. Площадь АРЗР, коэффициент η и максимальный диаметр D обрабатываемых деталей (площадь АРЗР – заштрихованная область а и б)

В третьей главе приведены доказательства корректности работы разработанного алгоритма поиска экстремума целевой функции и проведено исследование значимости варьируемых параметров в задаче поиска экстремума целевой функции η .

Разработанные для реализации методики ГА расчетные алгоритмы были проверены на примерах тестовых функций (Таблица 4).

Таблица 4.

Тестовые функции		
Модель	Уравнения тестовой функции	Параметрические ограничения
Растригина (Rastrigin)	$F(\alpha_1, \alpha_2) = 20 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 - 10(\cos 2\pi\alpha_1 + \cos 2\pi\alpha_2)$	$-5,0 \leq \alpha_1 \leq 5,0;$ $-5,0 \leq \alpha_2 \leq 5,0.$
Шекеля (Shekel)	$F(\alpha_1, \alpha_2) = [1 + (\alpha_1 - 2)^2 + (\alpha_2 - 2)^2]^{-1} + [2 + (\alpha_1 - 10)^2 + (\alpha_2 - 15)^2]^{-1} + [2 + (\alpha_1 - 18)^2 + (\alpha_2 - 4)^2]^{-1}$	$0 \leq \alpha_1 \leq 20;$ $0 \leq \alpha_2 \leq 20.$

Для модели Растригина: поиск максимального значения функции $F_{max} = 80.7$ при соответствующих параметрах $\alpha_1 = -4.525, 4.525$, и $\alpha_2 = -4.525, 4.525$ (Рис. 10, а).

Для модели Шекеля: поиск максимального значения функции $F_{max} = 1.01$ при соответствующих параметрах $\alpha_1 = 2$ и $\alpha_2 = 10$ (Рис. 10, б).

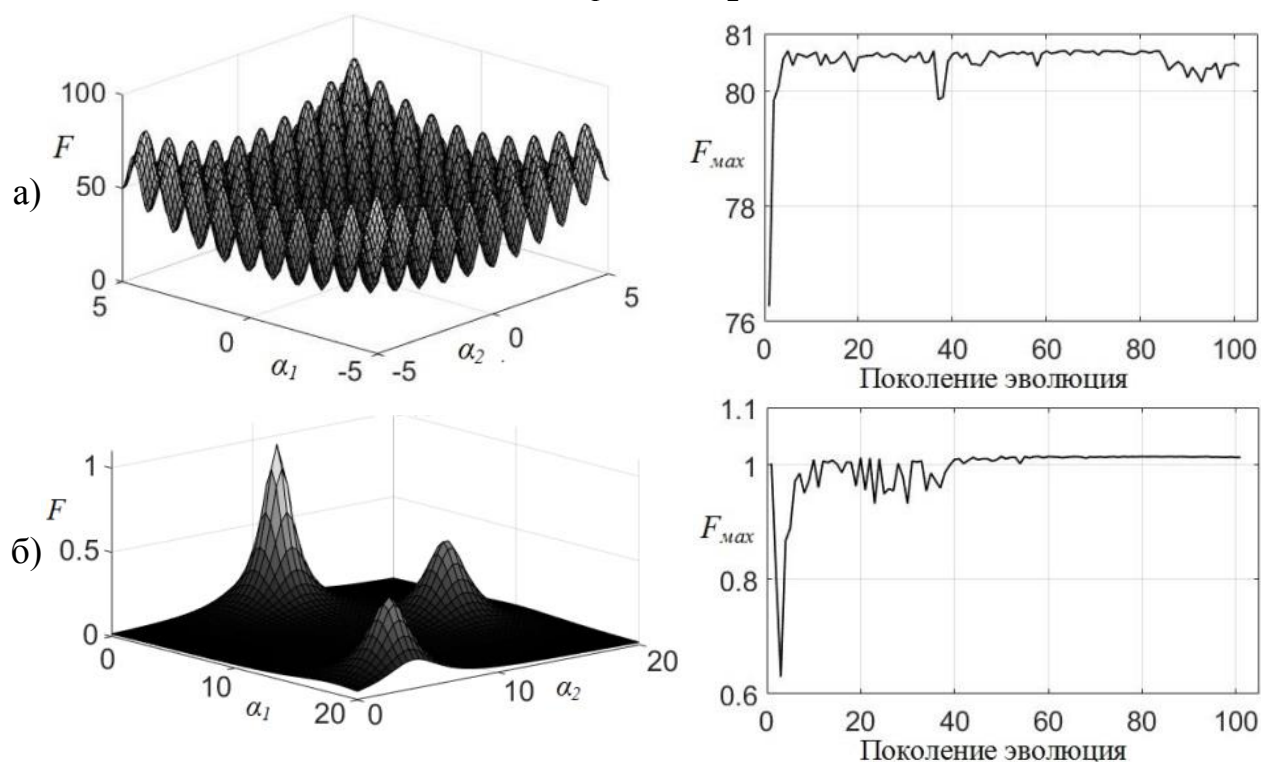


Рис. 10. Вид модели и экстремум тестовых функций:

а) Растригина; б) Шекеля

Результаты исследования зависимости наиболее значимых варьируемых параметров в задаче поиска экстремума целевой функции η показаны на Рис. 11.

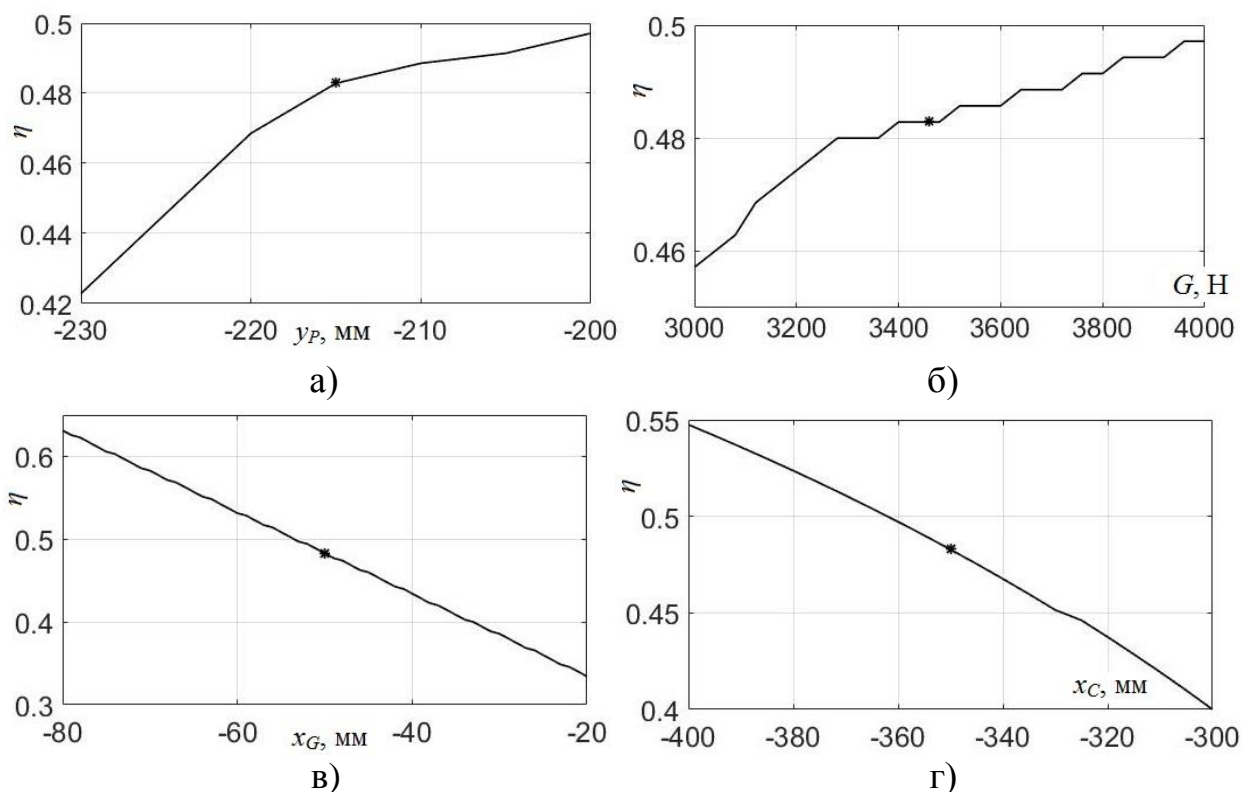


Рис. 11. Зависимость целевой функции η от варьируемых параметров: а) координаты вершины резца y_P ; б) силы тяжести суппортной группы G ; в) положения центра тяжести суппорта x_G ; г) расстояния x_C между направляющими; точка * – начальное значение варьируемых параметров компоновки (параметры конструкции исследуемой модели станка)

Показанные результаты стали основополагающими при составлении технического задания по исследованию возможности совершенствования конструкции станка модели 16КС20-01-L.

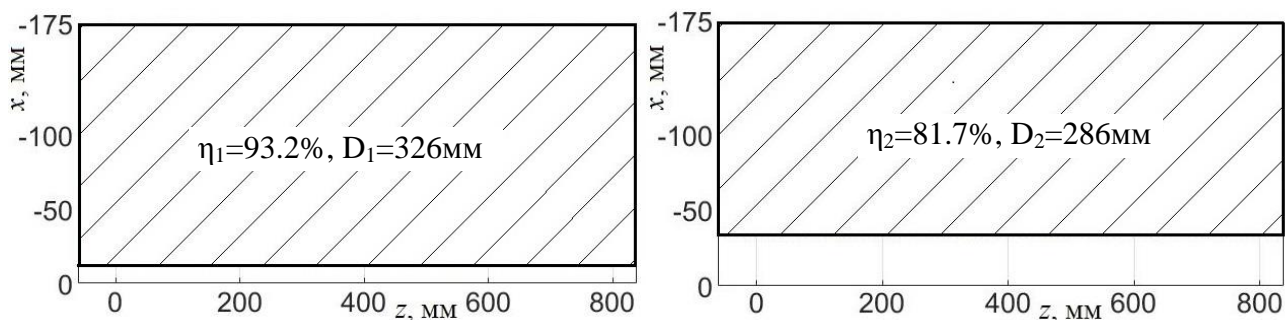
В четвертой главе приведены результаты, составляющие практическую значимость проведенных диссертационных исследований, определены общие выводы по работе и указаны работы автора, содержащие основные положения диссертации.

Проведенные консультации со специалистами ООО «Коломнаспецстанок» привели к задаче модернизации выпускаемых в настоящее время токарных станков модели 16КС20-01-L с определением параметров конструкции для достижения максимального увеличения площади АРЗР.

При этом были определены следующие параметры, изменение которых практически является возможным:

- сила тяжести суппортной группы G в сторону увеличения на 100 Н;
- положение центра тяжести суппорта x_G, z_G в пределах;
- координата y_Q точки приложения силы Q от привода подачи в пределах;
- координата вершины резца z_P в пределах.

На Рис.12 показаны результаты выполненных расчетов для параметров конструкции, выпускаемых в настоящее время токарных станков модели 16КС20-01-L.



а) нераскрытие стыка по длине

б) нераскрытие стыка по ширине

Рис. 12. Площадь АРЗР, коэффициент η и максимальный диаметр D обрабатываемых деталей (площадь АРЗР – заштрихованная область а и б)

Другим важным результатом, составляющим практическую значимость проведенных исследований является разработанный комплекс программных средств, для выполнения расчетов по поиску параметров конструкций токарных станков с достижением максимума целевой функции η . При этом используется среда МАТЛАБ 2015.

Для решения задачи оптимизации конструкции произвольного токарного станка выполняется ввод необходимой информации о варьируемых параметрах, в полу автоматическом режиме составляется система уравнений статики для расчета эпюр давления в направляющих. Устанавливается последовательность использования приложений среды МАТЛАБ для реализации расчетов по методике ГА.

Общие выводы.

1. Разработана методика автоматизированного определения параметров компоновки станков, при которых АРЗР, где не происходит раскрытия стыков в направляющих, имеет наибольшую площадь. В качестве целевой функцией оптимизации принято максимальное значение коэффициента η , равное отношению площади АРЗР (S_A) к площади ПРЗР (S_P).

2. Доказана эффективность результата оптимизации на примере конкретных моделей металлорежущего станка мод. 16K20T1. В результате проведенных исследований площадь АРЗР для данного станка для условия «не раскрытия» стыка по длине направляющих может быть увеличена на 62.9% и на 68.3% для условия «не раскрытия» стыка по как по длине так и по ширине направляющих с соответствующим увеличением максимального диаметра обрабатываемых деталей до $D_1=362\text{мм}$ и $D_2=325\text{мм}$, что существенно больше, чем у станка модели 16K20T1 с начальными параметрами компоновки $D_1=201\text{мм}$ и $D_2=169\text{мм}$.

3. Решены задачи поиска экстремума целевой функции на основе разработки и применения алгоритмов особо быстрого математического моделирования контакта направляющих скольжения с оценкой параметров эпюр давления. При этом многопараметрическая оптимизация выполнена с использованием методики ГА. Достоверность разработанных программ математического моделирования была доказана, а расчетные алгоритмы были проверены на примерах

тестовых функций Растригина, Шекеля, Химмельблау и Розенброка.

4. Определены зависимости целевой функции η оптимизации от наиболее значимых варьируемых параметров конструкции станков. Зависимость целевой функции η от значимых варьируемых параметров станка создана разная и нелинейная линия, при которой оптимизация целевой функции η определена страховую задачу.

5. Разработан комплекс программных средств для оптимизации конструкции металлорежущего станка, реализующего разработанные алгоритмы с возможностью решения системы сил и реакций в направляющих по уравнениям статики с 7-ю и 9-ю неизвестными.

6. Разработаны и приняты к внедрению рекомендаций по изменению параметров конструкции изготавливаемых в настоящее время в ООО «Коломнаспецстанок» станка модели 16КС20-01-L. В результате проведенных исследований площадь АРЗР для данного станка для условия «не раскрытия» стыка по длине направляющих может быть увеличена на 43.2% и на 35.5% для условия «не раскрытия» стыка по как по длине так и по ширине направляющих с соответствующим увеличением максимального диаметра обрабатываемых деталей до $D_1=326\text{мм}$ и $D_2=286\text{мм}$, что существенно больше, чем у станка модели 16КС20-01-L с начальными параметрами компоновки $D_1=228\text{мм}$ и $D_2=211\text{мм}$.

7. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе студентов кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана в дисциплинах «Теоретические основы расчета и проектирования станков» и «Методы совершенствования металлорежущих станков и комплексов».

Приложение к диссертации содержит акт принятия к предложению по расчету и оптимизации АРЗР на конструкции токарного станка.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Цзи Шоучэн. Оптимизация координат зоны резания в станках с ЧПУ. Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». Москва. 2014. С. 1 – 8. http://studvesna.ru/db_files/articles/1136/article.pdf. (0,5 п.л.)
2. Цзи Шоучэн, Чернянский П.М. Методика повышения точности системы позиционирования металлорежущих станков. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 2014, № 12. С. 12 – 21. DOI: 10.7463/1214.0750300. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)
3. Цзи Шоучэн. Разработка типового расчета оптимизации координат зоны резания токарных станков. Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». Москва. 2015. С. 1 – 8. http://studvesna.ru/db_files/articles/1357/article.pdf. (0,5 п.л.)
4. Цзи Шоучэн, Чернянский П.М. Методика оптимизации координат зоны резания в токарных станках. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 2015, № 10. С. 36 – 46. DOI: 10.7463/1015.0823142. (0,69 п.л. / 0,45 п.л.)
5. Цзи Шоучэн. Оптимизация системы позиционирования в станках по математическому программированию. Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». Москва. 2016. С. 1 – 3. http://studvesna.ru/db_files/articles/1628/thesis.pdf. (0,19 п.л.)
6. Цзи Шоучэн, Утенков В.М., Молчанов А.А. Оптимизация компоновок станков на основе расчета эпюры давлений на поверхности направляющих. Журнал «Известия высших учебных заведений. Машиностроение». МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017, № 9 (690). С. 22 – 30. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-22-30. (0,57 п.л. / 0,3 п.л.)