

УДК 621.01

DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-22-30

Оптимизация компоновок станков на основе расчета эпюры давления на поверхности направляющих*

Шоучэн Цзи, В.М. Утенков, А.А. Молчанов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

The Optimization of the Machine Layout Based on Pressure Line Calculations on the Guides Surface

Shoucheng Ji, V.M. Utenkov, A.A. Molchanov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: jisc@sina.cn, utencov@bmstu.ru, alexandrmolchanov@inbox.ru



Точность обработки в рабочей зоне металлорежущих станков неодинакова. Наиболее резко ухудшаются условия обработки деталей, когда возникает раскрытие стыка в направляющих (эпюра давления в гранях направляющих распределена не по всей их длине). Проведены расчет и оптимизация активной рабочей зоны резания станков, в которой эпюра давления направляющих распределена по всей их поверхности. Компоновка станка должна обеспечить наибольшую площадь активной рабочей зоны резания. Задача оптимизации такой зоны является нелинейной и экстремальной. На основе параметров конструкции токарного станка создана система уравнений для расчета эпюры давления в направляющих. Для поиска экстремума целевой функции изменялись такие параметры компоновки станка, как положение вектора силы резания (координаты вершины резца в координатной системе направляющих), сила тяжести и положение центра тяжести суппорта, координаты точки приложения силы от привода подачи, расстояния между направляющими и длина суппорта. Для сокращения времени вычисления экстремума целевой функции использована методика генетического алгоритма. Применение такой методики позволило примерно в 10 раз повысить скорость определения параметров компоновки станка, обеспечивающих наибольшую по площади активную рабочую зону резания.

Ключевые слова: точность обработки, активная рабочая зона резания, оптимизация, генетический алгоритм



The accuracy of processing in the working zone of machine tools is uneven. Machining conditions deteriorate rapidly when an opening in the joint guideways occurs (the pressure line is not distributed along the whole length of the guide surfaces). The calculations and optimization of the active cutting zone where the pressure line is distributed along the whole surface of the guideways are performed. The layout of the machine tool should provide the largest area of the active working cutting zone. The optimization task is non-linear and extreme. Based on the parameters of the lathe design, a system of equations is created to calculate the pressure line in the guideways. To find the extreme point of the objective function, the following parameters of the machine tool layout are changed: the position of the cutting force vector (cutter tip coordinates in the guideways' system of coordinates), gravitational force and the position of the centre of

* Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0128 (ID RFMEFI57714X0128).

gravity of the support, coordinates of the point of application of the force bound to the feed drive, distance between the guides and length of the support. The genetic algorithm method is used to shorten the time of calculating the extreme point of the objective function. The application of this method increases 10 times the speed of determining the machine tool layout parameters that would provide the largest area of the active working cutting zone.

Keywords: machining accuracy, active working cutting zone, optimization, genetic algorithm

Компоновка станков, имеющая блочную структуру, 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.

Основополагающие исследования, посвященные анализу влияния компоновки станков на их работоспособность, приведены в работах Ю.Д. Врагова, З.М. Левиной, Д.Н. Решетова и др. [1–4]. Обобщение опыта применения в станкостроении методов оптимизации параметров компоновки изложено в диссертации [4]. В статьях [5, 6] впервые рассмотрена гипотеза о возможности оптимизации конструкции токарных станков путем выбора параметров их компоновки, обеспечивающих наибольшую площадь активной рабочей зоны резания (АРЗР). Если координаты подвижного резца находятся в АРЗР, то в направляющих станка не возникает раскрытия стыка.

В рабочей зоне металлорежущих станков точность обработки, основанной на относительном перемещении заготовки и режущего инструмента, является неодинаковой. Условия обработки деталей резко ухудшаются при раскрытии стыка в направляющих (эпюра давления в гранях направляющих распределена не по всем длинам).

Цель работы — создать методику определения параметров компоновки станка, при которых АРЗР имеет наибольшую площадь, и показать целесообразность такой оптимизации на примере конкретной модели металлорежущего станка.

В качестве целевой функции оптимизации принимаем максимальное значение коэффициента η , равное отношению площади АРЗР S_A к площади полной рабочей зоны резания (ПРЗР) S_n . Поиск экстремума целевой функции (коэффициента η) является нелинейной экс-

тремальной задачей, которую можно решить, составив систему математических уравнений внешних сил и моментов, действующих на рабочий орган станка. При необходимости определения оптимальных параметров компоновки станка надо отказаться от простых переборов их возможных значений (на практике — это десятки часов машинного времени ЭВМ). В этом случае целесообразно использовать методику генетического алгоритма (ГА) математического моделирования [7, 8].

Методы ГА — это адаптивные методы поиска, применяемые в последнее время для решения задач оптимизации. В них используют аналогии как механизма генетического наследования, так и естественного отбора. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры [7].

Создание системы уравнений для определения эпюры давления в направляющих. Для расчета АРЗР в станках необходимо вычислить эпюру давления в их направляющих. Рассмотрим методику определения удельных давлений в направляющих на примере токарного станка 16К20Т1 (рис. 1).

Оси координат совпадают с направлениями составляющих сил резания, начало координат выбрано в точке пересечения реакций на треугольной направляющей ($\alpha = 55^\circ$ — угол направляющей грани A и оси X ; $\beta = 45^\circ$ — угол направляющей грани B и оси X).

При перемещении суппорта (или стола) по направляющим станины станка на него действуют составляющие силы резания P (P_x, P_y, P_z), перемещающая суппорт сила тяги Q и сила тяжести суппорта G [2]. В результате действия этих внешних сил в направляющих возникают реакции, которые и определяют эпюру давления. Ширина граней C, B, A направляющих: $c = 22$ мм; $b = 33$ мм; $a = 25$ мм. Длина суппорта $l = 660$ мм. Максимальная длина обработки $L = 900$ мм. Входные параметры расчетных сил [2] приведены ниже.

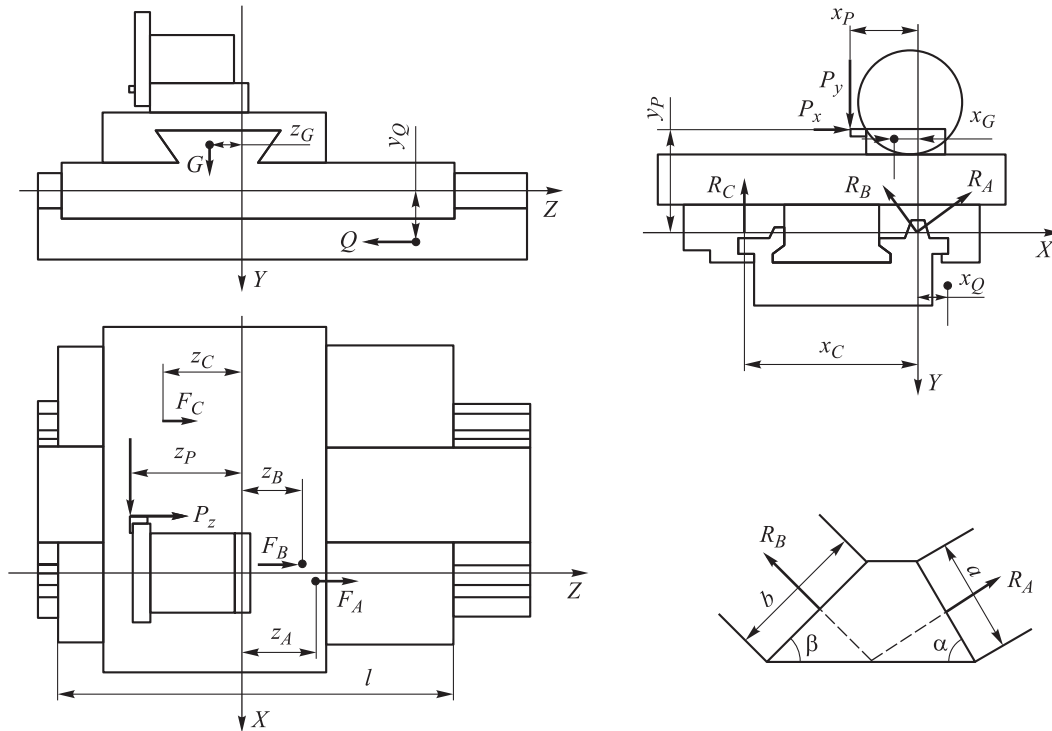


Рис. 1. Расчетная схема сил, действующих в направляющих станка 16K20T1:
 F_C, F_A, F_B — силы трения в направляющих

Входные параметры расчетных сил

Сила тяжести, Н	3 460
Составляющие силы резания $P_y/P_x/P_z$, Н	4 000/2 000/1 000
Координата, мм, точки приложения:	
силы тяжести x_G/z_G	-50/30
силы резания y_P/z_P	-215/-95/
силы тяги x_Q/y_Q	50/110
реакции R_C x_{R_C}/y_{R_C}	-350/0

Проецируя все силы на оси и взяв сумму моментов относительно осей, запишем уравнения статики [2, 9]:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum z &= f(R_A + R_B + R_C) + P_z + Q = 0; \\ \sum x &= R_B \sin \beta - R_A \sin \alpha - P_x = 0; \\ \sum y &= R_B \cos \beta + R_A \cos \alpha + R_C - P_y - G = 0; \\ \sum M_z &= R_C x_C + P_x y_P - G x_G - P_y x_P = 0; \\ \sum M_x &= R_C z_C + R_B \cos \beta z_B + R_A \cos \alpha z_A + \\ &+ P_z y_P + Q y_Q - P_y z_P - G z_G = 0; \\ \sum M_y &= P_z x_P - P_x z_P + R_C f x_C + Q x_Q + \\ &+ R_B \sin \beta z_B - R_A \sin \alpha z_A = 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $\sum z$, $\sum x$ и $\sum y$ — сумма проекций сил соответственно на оси z , x и y ; $\sum M_z$, $\sum M_x$ и

$\sum M_y$ — сумма моментов относительно осей z , x и y соответственно; f — коэффициент трения, для данных условий $f = 0,15$ [2, 10].

Если в направляющей действует сила (реакция) R_A , которая смещена от середины грани A направляющих на расстояние z_A , то при линейной эпюре давления его наибольшее p_{A1} и наименьшее p_{A2} значения можно вычислить по формулам [2, 9]

$$\left\{ \begin{aligned} p_{A1} &= \frac{R_A}{al} \left(1 + 6 \frac{z_A}{l} \right); \\ p_{A2} &= \frac{R_A}{al} \left(1 - 6 \frac{z_A}{l} \right). \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В общем виде эпюра давления имеет вид трапеции. При $z_A = 0$ (т. е. при приложении силы в центре направляющих) $p_{A1} = p_{A2} = R_A/(al) = \text{const}$, тогда эпюра давления становится прямоугольной, а при $z_A = l/6$ $p_{A1} = 0$, $p_{A2} = 2R_A/(al)$ — треугольной.

В системе уравнений (1) семь неизвестных параметров. Приведенную ширину треугольных направляющих определяют по формуле [2, 9]

$$e = b \cos^2 \beta + a \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Для достаточно жестких салазок и направляющих, нагруженных относительно равно-

мерно, можно считать, что момент сил распределен между направляющими e и c пропорционально их ширине, т. е. [2]

$$\frac{R_C z_C}{R_B \cos \beta z_B + R_A \cos \alpha z_A} = \frac{c}{e}. \quad (4)$$

Из системы уравнений (1)–(4) получим параметры эпюры давления в направляющих:

$$\begin{cases} p_{C1} = \frac{R_C}{lc} \left(1 - \frac{6z_C}{l}\right); p_{C2} = \frac{R_C}{lc} \left(1 + \frac{6z_C}{l}\right); \\ p_{A1} = \frac{R_A}{la} \left(1 - \frac{6z_A}{l}\right); p_{A2} = \frac{R_A}{la} \left(1 + \frac{6z_A}{l}\right); \\ p_{B1} = \frac{R_B}{lb} \left(1 - \frac{6z_B}{l}\right); p_{B2} = \frac{R_B}{lb} \left(1 + \frac{6z_B}{l}\right), \end{cases} \quad (5)$$

где p_{C1} , p_{B1} и p_{C2} , p_{B2} — наибольшие и наименьшие давления, действующие на грани направляющих C и B соответственно.

$$\begin{aligned} R_C &= \frac{Gx_G + P_y x_P - P_x y_P}{x_C}; \\ R_A &= \frac{(G + P_y - R_C) \sin \beta - P_x \cos \beta}{\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta}; \\ R_B &= \frac{P_x + R_A \sin \alpha}{\sin \beta}; \\ Q &= -P_z - f(R_C + R_A + R_B); \\ z_C &= \frac{P_y z_P + Gz_G - P_z y_P - Qy_Q}{R_C \left(1 + \frac{e}{c}\right)}; \\ z_A &= \frac{R_C z_C \frac{e}{c} \sin \beta}{R_A (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta)} + \\ &+ \frac{(P_z x_P - P_x z_P + R_C f x_C + Qx_Q) \cos \beta}{R_A (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta)}; \\ z_B &= \frac{R_C z_C \frac{e}{c} - R_A z_A \cos \alpha}{R_B \cos \beta}. \end{aligned}$$

Площадь АРЗР определяется по формуле

$$S_A = \iint_{XZ} f(x, z, p) dx dz, \quad (6)$$

где p — давления (p_A, p_B, p_C) в направляющих, при условии $p > 0$ $f(x, z, p) = 1$; x, z — координаты резца в ПРЗР; X, Z — пределы координат в ПРЗР (для данного станка пределы X равны -175 и 0 мм, а пределы Z — -95 и 805 мм).

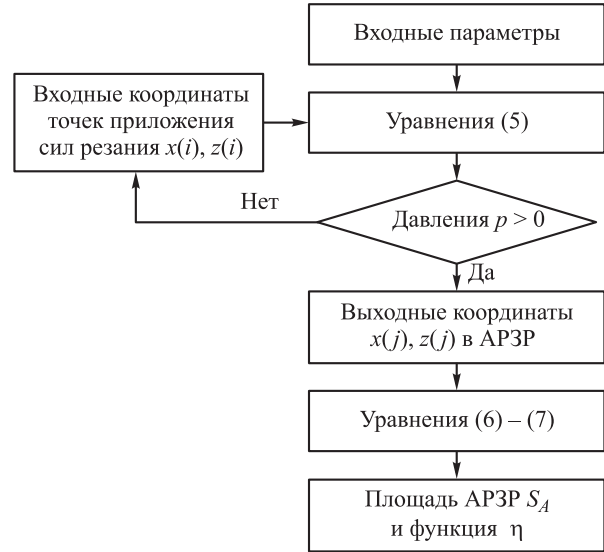


Рис. 2. Блок-схема расчета площади АРЗР и коэффициента η

Коэффициент

$$\eta = \frac{S_A}{S_{\Pi}}. \quad (7)$$

Чем выше коэффициент η , тем для большей номенклатуры деталей получим потенциальную возможность самой высокой точности обработки [6]. Для исходных данных станка АРЗР вычисляется с помощью математической итерации и интеграции в программном пакете MATLAB 12.0b. Схема расчета площади АРЗР и коэффициента η показана на рис. 2.

На рис. 3 показана площадь АРЗР, а также приведены коэффициент η и максимальный диаметр D обрабатываемых деталей при различных значениях составляющих силы резания для компоновки станка 16K20T1.

Как уже упоминалось, коэффициент η может быть целевой функцией оптимизации конструкции металлорежущих станков. В этом исследовании использованы нормальные силы резания, которые постоянны (рис. 3, в). Варьируемыми параметрами компоновки станка являются положение вектора сил резания (координаты (y_P, z_P) вершины резца в координатной системе направляющих), сила тяжести G и положение центра тяжести (x_G, z_G) суппорта, координаты точки приложения силы от привода подачи (x_Q, y_Q) , расстояния между направляющими x_C и длина суппорта l .

Определение экстремума целевой функции выполняли с помощью методики моделирования по ГА. При этом применяли принятые

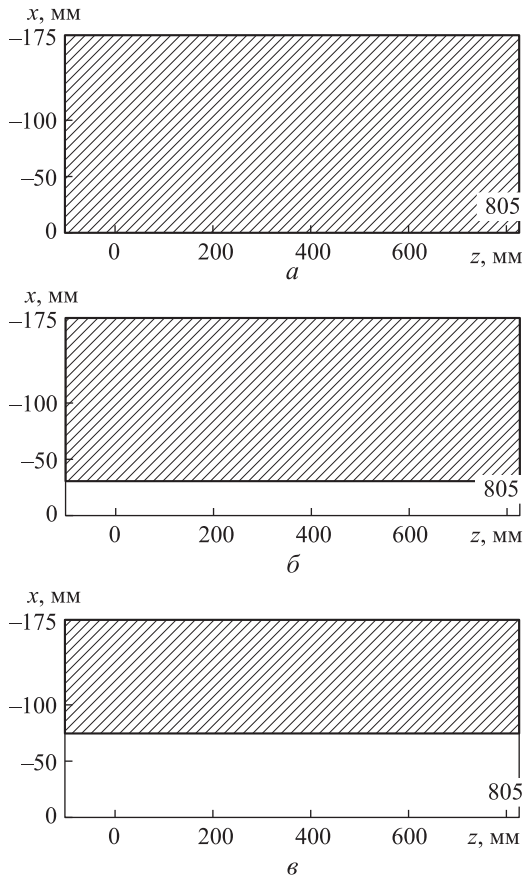


Рис. 3. Площадь АРЗР (заштрихованная область), полученная при различных значениях составляющих силы резания:
 а — $P_y = 0, P_x = 0, P_z = 0$ ($\eta = 1, D = 350$ мм); б — $P_y = 2$ кН, $P_x = 1$ кН, $P_z = 0,5$ кН ($\eta = 85,4$ %, $D = 299$ мм);
 в — $P_y = 4$ кН, $P_x = 2$ кН, $P_z = 1$ кН ($\eta = 57,4$ %, $D = 201$ мм)

в ней термины, основными из которых являются следующие понятия. *Хромосома* — набор упорядоченных чисел, служит частью решения, в большинстве случаев представлена в виде строки из 0 и 1. *Индивидуум (особь)* — набор хромосом, представляет собой закодированное решение задачи. В некоторых случаях особь состоит из одной хромосомы. Иными словами, это точка в пространстве поиска. *Популяция* — совокупность индивидуумов [8].

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 равно 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 формируется новое поколение индивидуумов с помощью трех генетических операторов: селекции, кроссинговера и мутации [11, 12].

Действие оператора кроссинговера приводит к созданию двух потомков родительской пары. Вероятность кроссинговера — самая высокая среди генетических операторов — равна 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.

Методика оценки экстремума целевой функции η с применением ГА состоит из двух этапов: получения целевой функции по системе уравнений от входных варьируемых параметров и поиска экстремальной целевой функции по процессам ГА. Описанные выше варьируемые параметры компоновки станка определяют входные величины популяции Φ в методике ГА:

$$\Phi = [y_P, z_P, G, x_G, z_G, x_Q, y_Q, x_C, l].$$

Значение целевой функции η — выходная величина приспособленности ГА. Концептуальная схема методики расчета представлена на рис. 4 [12–14]. Условие конца — требование поколения.

Реализация расчета экстремума целевой функции.

Для достаточно точной оценки экстремума целевой функции объем популяции входных параметров выбран равным 150 при 50 поколениях эволюции. Три генетических оператора (селекция, кроссинговер и мутация) в MATLAB используют функции *select*, *cross*, *mutation* [8, 13]. Зоны входных варьируемых параметров и параметры моделирования ГА приведены ниже [12, 14–16].

Диапазоны входных варьируемых параметров

Сила тяжести $G, Н$	3 000...4 000
Расстояние между направляющими суппорта $x_C, мм$	-400...-300
Длина суппорта $l, мм$	500...700
Координата, мм, точки приложения:	
силы резания y_P/z_P	-240...-180/-150...0
силы тяжести x_G/z_G	-80...20/-70...20
силы тяги x_Q/y_Q	30...80/70...140



Рис. 4. Концептуальная блок-схема оптимизации методики ГА

Параметры моделирования ГА

Шаг перемещения суппорта, мм	0,01
Поколение эволюции	50
Объем популяции	150
Вероятность кроссинговера	0,7
Вероятность мутации	0,1

Каждое поколение эволюции имеет 150 значений целевой функции. Определенные максимальные значения коэффициента η в каждом поколении эволюции (всего 51) приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что для лучшего варианта $\eta = 91,4\%$. Ему соответствуют следующие значения входных варьируемых параметров:

- $y_p = -183$ мм;
- $z_p = -47$ мм;
- $G = 3\ 853$ Н;
- $x_G = -79$ мм;
- $z_G = -61$ мм;
- $x_C = -375$ мм;
- $l = 568$ мм;
- $x_Q = 64$ мм;
- $y_Q = 86$ мм.

АРЗР для такого варианта компоновки показана на рис. 6. В этом случае максимальный

диаметр детали, при обработке которой не произойдет «раскрытия стыка», составил $D = 343$ мм, что больше, чем у станка 16К20Т1 с начальными параметрами компоновки ($D = 220$ мм).

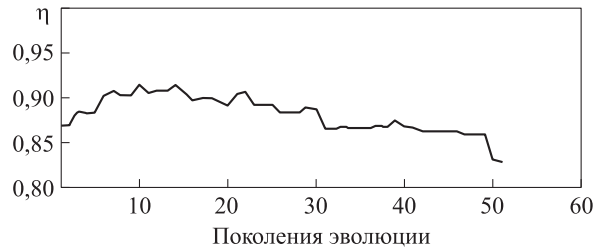


Рис. 5. Максимальные значения коэффициента η в каждом поколении эволюции

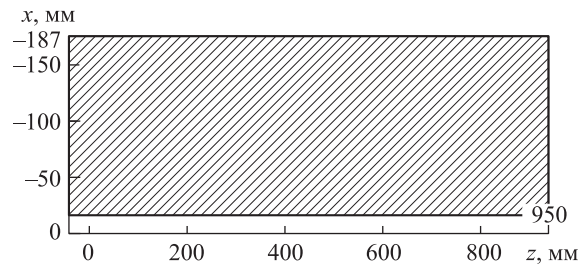


Рис. 6. Площадь АРЗР для лучшего варианта компоновки станка ($\eta = 91,4\%$; $D = 343$ мм)

Выводы

1. Показана новая возможность повышения эффективности разработки компоновки металлорежущих станков. При этом существенно увеличивается АРЗР, в которой эпюра давления направляющих распределена по всей их поверхности. Это минимизирует риски потери

точности по причине «раскрытия стыка» в направляющих.

2. Разработано и апробировано программное обеспечение методики ГА, позволяющее выполнить операции поиска экстремума целевой функции — максимальной площади АРЗР — и определить соответствующие ей варьируемые параметры компоновки станка.

Литература

- [1] Брагов Ю.Д. *Анализ компоновок металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1978. 208 с.
- [2] Проников А.С., ред. *Металлорежущие станки и автоматы*. Москва, Машиностроение, 1981. 479 с.
- [3] Левина З.М., Решетов Д.Н. *Контактная жесткость машин*. Москва, Машиностроение, 1971. 264 с.
- [4] Ершов А.А. *Влияние контактных характеристик соединений корпусных деталей на показатели статической точности станков*. Дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2001. 131 с.
- [5] Цзи Ш., Чернянский П.М. Методика повышения точности системы позиционирования металлорежущих станков. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 12–21. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/750300.html> (дата обращения 15 марта 2017), doi: 10.7463/1214.0750300.
- [6] Цзи Ш., Чернянский П.М. Методика оптимизации координат зоны резания в токарных станках. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 10, с. 36–46. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/823142.html> (дата обращения 15 марта 2017), doi: 10.7463/1015.0823142.
- [7] Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Генетические алгоритмы*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
- [8] Лукьянов Н.Д. *Параметрическая оптимизация автоматических систем стабилизации с помощью генетического алгоритма*. Дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2014. 138 с.
- [9] Чернянский П.М., ред. *Проектирование автоматизированных станков и комплексов*. В 2 т. Т. 1. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 331 с.
- [10] Гуртяков А.М. *Расчет и проектирование металлорежущих станков*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 136 с.
- [11] Тарасенко А.А. *Исследование генетических алгоритмов оптимизации: выпускная квалификационная работа*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 44 с.
- [12] Иглин С.П. *Математические расчеты на базе MATLAB*. Санкт-Петербург, Изд-во БХВ-Петербург, 2005. 640 с.
- [13] Guo Hai Ding, Lu Zhi Feng. Structure design optimization based on BP-Neural networks and genetic algorithms. *Journal of Aerospace Power (China)*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 197–210.
- [14] Литвиненко В.И. Метод индуктивного синтеза РБФ нейронных сетей с помощью алгоритма клонального отбора. *Индуктивне моделювання складних систем*, 2012, вып. 4, с. 114–127.
- [15] Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла. *Научный вестник НГТУ*, 2014, т. 55, № 2, с. 36–42.
- [16] Matthew Hall. A cumulative Multi-Niching genetic algorithm for multimodal function optimization. *International journal of advanced research in artificial intelligence*, 2012, vol. 1, no. 9, pp. 6–13.

References

- [1] Vragov Iu.D. *Analiz komponentov metallorazhushchikh stankov* [The analysis of configurations of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978. 208 p.
- [2] *Metallorazhushchie stanki i avtomaty* [Machine tools and cutting machines]. Ed. Pronikov A.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981. 479 p.
- [3] Levina Z.M., Reshetov D.N. *Kontaktnaia zhestkost' mashin* [Contact rigidity of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1971. 264 p.
- [4] Ershov A.A. *Vliianie kontaktnykh kharakteristik soedinenii korpusnykh detalei na pokazateli staticheskoi tochnosti stankov*. Diss. kand. tekhn. nauk [The influence of the contact characteristics of joints of body parts on the performance static accuracy of machine tools. Cand. tech. sci. diss.]. Nizhniy Novgorod, 2001. 131 p.
- [5] Tszhi Sh., Chernianskii P.M. Metodika povysheniia tochnosti sistemy pozitsionirovaniia metallorazhushchikh stankov [Technique for Increasing Accuracy of Positioning System of Machine Tools]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 12, pp. 12–21. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/750300.html> (accessed 15 March 2017), doi: 10.7463/1214.0750300.
- [6] Tszhi Sh., Chernianskii P.M. Metodika optimizatsii koordinat zony rezaniia v tokarnykh stankakh [The Optimizing Method of the Coordinates in the Lathe Cutting Zone]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2015, no. 10, pp. 36–46. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/823142.html> (accessed 15 March 2017), doi: 10.7463/1015.0823142.
- [7] Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Moscow, FIZMATLIT publ., 2006. 320 p.
- [8] Luk'ianov N.D. *Parametricheskaia optimizatsiia avtomaticheskikh sistem stabilizatsii s pomoshch'iu geneticheskogo algoritma*. Diss. kand. tekhn. nauk [Parametric optimization of automatic system stabilization using genetic algorithm. Cand. tech. sci. diss.]. Irkutsk, 2014. 138 p.
- [9] *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov* [Design of automated machines and complexes]. Ed. Chernianskii P.M. In 2 vol. Vol. 1. Moscow, Bauman Press, 2012. 331 p.
- [10] Gurtiakov A.M. *Raschet i proektirovanie metallorazhushchikh stankov* [Calculation and design of machine tools]. Tomsk, TPU publ., 2011. 136 p.
- [11] Tarasenko A.A. *Issledovanie geneticheskikh algoritmov optimizatsii: vypusknaiia kvalifikatsionnaia rabota* [The study of genetic optimization algorithms: final qualification work]. Tomsk, TPU publ., 2010. 44 p.
- [12] Iglin S.P. *Matematicheskie raschety na baze MATLAB* [Mathematical calculations based on MATLAB]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2005. 640 p.
- [13] Guo Hai Ding, Lu Zhi Feng. Structure design optimization based on BP-Neural networks and genetic algorithms. *Journal of Aerospace Power (China)*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 197–210.
- [14] Litvinenko V.I. Metod induktivnogo sinteza RBF neironnykh setei s pomoshch'iu algoritma klonal'nogo otbora [The inductive method of synthesis of RBF neural networks with clonal selection algorithm]. *Induktivne modeliuvaniia skladnikh sistem* [Inductive modeling of complex systems]. 2012, is. 4, pp. 114–127.
- [15] Kutsyi N.N., Luk'ianov N.D. Sintez sistemy upravleniia mnogosviaznym ob'ektom s pomoshch'iu geneticheskogo algoritma na primere priamotochnogo kotla [Control system synthesis by a multivariable object using the genetic algorithm (on the example of the once-through boiler)]. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU]. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 36–42.
- [16] Hall M. A cumulative Multi-Niching genetic algorithm for multimodal function optimization. *International journal of advanced research in artificial intelligence*, 2012, vol. 1, no. 9, pp. 6–13.

Информация об авторах

ШОУЧЭН Цзи (Москва) — аспирант кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: jisc@sina.cn).

УТЕНКОВ Владимир Михайлович (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: utencov@bmstu.ru).

МОЛЧАНОВ Александр Александрович (Москва) — аспирант кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexandrmolchanov@inbox.ru).

Information about the authors

SHOUCHENG JI (Moscow) — Postgraduate, Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jisc@sina.cn).

UTENKOV Vladimir Mikhailovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: utencov@bmstu.ru).

MOLCHANOV Aleksandr Aleksandrovich (Moscow) — Postgraduate, Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: alexandrmolchanov@inbox.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 3-е издание учебного пособия
В.П. Строгалева, И.О. Толкачевой
«Имитационное моделирование»

Изложены основные вопросы, связанные с построением моделей реальных систем, проведением компьютерных экспериментов на моделях и управлением этими экспериментами. Подробно рассмотрены принципы имитационного моделирования и представлен соответствующий математический аппарат с большим количеством примеров.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, специализирующихся в области разработки сложных технических систем, а также для специалистов, занимающихся прикладными исследованиями, и руководителей различного рода предприятий.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru