

УДК 621.9.27.004.42

И. С. Носиров, А. М. Белов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Оптимизация параметров процесса резания токарного станка с ЧПУ с использованием генетического алгоритма

*Рассматривается оптимизация параметров механической обработки на токарном станке с использованием искусственного интеллекта. Определение оптимальных параметров резания имеет важное значение для экономичной обработки и играет важную роль в уменьшении ошибок обработки и сохранении устойчивости оснастки станка. Чтобы получить большую эффективность и производительность станка, необходимо добиться оптимальных параметров процесса резания, для чего был использован генетический алгоритм (ГА). В результате анализа существующих методов исследований выявлено, что его использование эффективно при прогнозировании формы и шероховатости поверхностей деталей при механической обработке. Рассмотрена оптимизация параметров процесса механической обработки для различных глубин резания. Определены оптимальные параметры обработки (глубина резания, скорость подачи для улучшения шероховатости поверхности). Также была получена минимальная стоимость резания.*

### Токарная обработка, параметры процесса резания, режимы резания, оптимизация, генетический алгоритм

**Постановка проблемы.** Современная тенденция в механической обработке заключается в достижении более высоких скоростей обработки материала с требуемой точностью, стремлении к максимальной производительности и обеспечении экономичности производства. Качество изготовления деталей на металлорежущих станках зависит от задания исходных параметров процесса резания. Их выбор влияет на срок службы инструмента, время обработки и стоимость изготовления. Минимизация затрат на обработку детали также служит в качестве одного из критериев определения оптимальных параметров резки. К факторам, влияющим на токарную обработку детали, относится изменение условий процесса обработки в зависимости от внутреннего изменения свойств рабочего материала, теплового расширения, износа инструмента и т. д. Это приводит к снижению качества обрабатываемой поверхности детали в процессе механической обработки.

К недостаткам существующих методик расчета оптимальных режимов резания можно отнести большое время расчета и то, что полученные после расчета данные не позволяют вести резание с наибольшей экономичностью. В настоящее время применяются различные методы оптимизации

режимов резания. Их выбор зависит от типа станка; способа металлообработки; свойств обрабатываемого материала и т. п. В основу методов оптимизации положены критерий качества с ограничениями в виде равенств и неравенств (целевая функция оптимизации) и математическая модель, отражающая процесс резания металлов. Для решения данной проблемы предлагается использовать автоматизированную систему управления электроприводами металлорежущего станка с применением искусственного интеллекта. Существуют некоторые ограничения (верхний и нижний пределы), которые влияют на выбор оптимальных условий резания – глубины резания, скорости подачи и скорости резания:

$$\begin{cases} h_{p.min} \leq h_p \leq h_{p.max}; \\ S_{min} \leq S \leq S_{max}; \\ v_{p.min} \leq v_p \leq v_{p.max}, \end{cases}$$

где  $h_{p.min}$ ,  $h_{p.max}$  – минимальная и максимальная глубины резания;  $S_{min}$ ,  $S_{max}$  – минимальная и максимальная скорости подачи;  $v_{p.min}$ ,  $v_{p.max}$  – минимальная и максимальная скорости резания.

Целью оптимизации служит определение оптимальных параметров обработки: скорости резания,

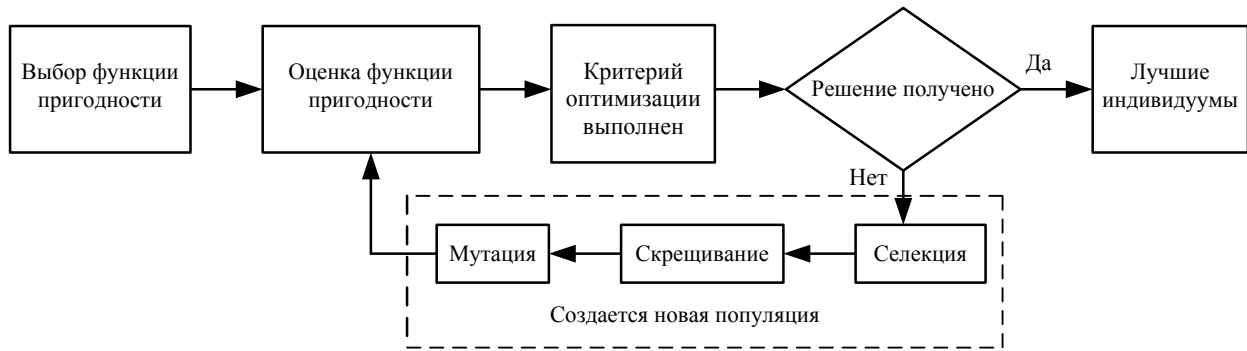


Рис. 1

скорости подачи и глубины резания. При этом одновременно минимизируется стоимость резания и срок службы используемого инструмента при многопроходном процессе токарной обработки.

Таким образом, оптимизация параметров процесса резания – одна из наиболее актуальных задач в процессе механической обработки деталей на металлорежущих станках, представляет собой многоцелевую задачу, для решения которой классические методы оптимизации подходят только в том случае, когда ее можно свести к однокритериальной задаче, что не всегда возможно. Поэтому для решения данной проблемы можно применять ГА. Генетический алгоритм, используемый для оптимизации и моделирования, сводится к случайному подбору, комбинированию и вариации искомым параметров с использованием механизмов, аналогичных отбору в биологических системах. Этот алгоритм основан на стохастических операциях. Генетический алгоритм ищет оптимальное решение в пространстве решений, начиная с групп точек, а не с начальной точки. На рис. 1 показана типичная схема генетического алгоритма [1]. Работа ГА основана на трех генетических операторах: селекции, скрещивании, мутации.

Основной элемент схемы ГА – это популяция особей, которая обычно составляет от 10 до 200. Каждый индивидум представляет собой возможное решение проблемы. Данные, обрабатываемые ГА, представлены массивом строк (или хромосом) с конечной длиной, где каждый бит, называется аллелем или геном. Значение функции пригодности прикреплено к каждому индивидуму, для того чтобы оценить его качество. Совокупность строк называется популяцией, а популяция в определенный момент времени называется поколением. Генерация начальной популяции строк выполняется случайным образом. Основными операторами на генах в хромосоме являются кроссовер и мутация. Воспроизведение неко-

торых выбранных хромосом – это процесс, в котором определенные двоичные строки преобразуются и передаются следующему поколению. Выбор хромосомы обычно осуществляется через так называемый механизм рулетки. Кроссовер – основной оператор, который генерирует новые строки, в конечном итоге с лучшими значениями пригодности. После кроссовера мутация выполняется для обеспечения некоторой случайности в новых хромосомах. Этот процесс создает новую популяцию, которая оценивается в соответствии с заранее определенными критериями. Процедура повторяется до тех пор, пока критерий остановки не будет удовлетворен, что достигается последовательным применением генетических операторов отбора, скрещивания и мутации, позволяя получать все более качественные решения оптимизации [2].

Процедура оптимизации состоит из двух этапов. Первый этап – математическое моделирование процесса обработки (используются характеристики резания), когда определяется целевая многопараметрическая функция. Второй этап – поиск глобального минимума целевой функции при всех ограничениях, наложенных на целевую функцию.

Математическая модель, которая описывает операцию обработки, определяется как комбинация тех функций, переменные которых необходимы для параметров резки. Математическая модель состоит из трех отдельных моделей:

1. Стойкость инструмента (резца), мин:

$$T^m = \frac{C_v K_v}{v_p h_p^x S^y},$$

где  $C_v$  – коэффициент, учитывающий условия обработки, при определении составляющей силы резания;  $K_v$  – поправочный коэффициент, произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания;  $T$  – стойкость инструмента, мин;  $h_p$  – глубина резания, мм;  $S$  – скорость подачи,

м/мин;  $x, y, m$  – показатели степени, зависящие от свойства обрабатываемого металла, материала резца и вида обработки соответственно.

Обобщенный поправочный коэффициент определяется по формуле

$$K_v = K_{M_v} K_{n_v} K_{u_v} K_{\phi_v} K_{r_v},$$

где  $K_{M_v}, K_{n_v}, K_{u_v}, K_{\phi_v}, K_{r_v}$  – коэффициенты, учитывающие влияние материала заготовки, состояние поверхности, материал инструмента, главный угол в плане резца и радиус при вершине резца (только для резцов из быстрорежущей стали).

Коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки, определяется по формуле

$$K_{M_v} = K_{r_v} \left( \frac{75}{\sigma_B} \right)^{n_v},$$

где  $n_v$  – показатель степени при определении составляющей силы резания при обработке резцами, выбирается из [3, таблица];  $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении, Н. Коэффициенты и показатели степени, входящие в это уравнение, приведены в той же таблице.

2. Составляющая силы резания при точении  $P_z$  (в ньютонах) определяется по формуле

$$P_z = 10C_v h_p^x S^y v_p^{n_v} K_v.$$

3. Эффективная мощность процесса резания  $N$  (в киловаттах) определяется по формуле

$$N = \frac{10C_v h_p^x S^y v_p^{n_v} K_v}{1020 \cdot 60},$$

или

$$N = \frac{P_z v_p}{1020 \cdot 60}.$$

На рис. 2 представлен блок оптимизации параметров процесса резания при механической обработке.

Исходные данные объекта – это данные о станке и инструменте, материале и формах детали, а также ограничения по времени и стоимости изготовления. Модель инструмента интегрирована в целевую функцию, в то время как модели силы и мощности резания представлены в виде ограничивающих функций.

Согласно [4], себестоимость единицы продукции для задачи многопроходной токарной обработки состоит из четырех основных компонентов стоимости:

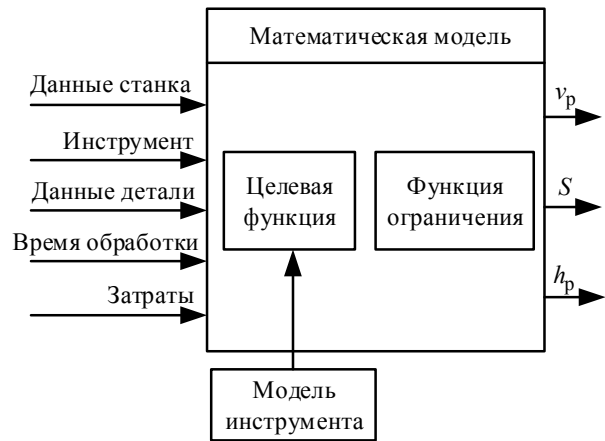


Рис. 2

- 1) резки по фактическому времени процесса резки;
- 2) холостого хода станка (операции загрузки, разгрузки и перемещения инструмента на холостом ходу);
- 3) замены инструмента;
- 4) инструмента.

В качестве критерия оптимизации принимается минимальное время производства, определяемое суммой различных времен обработки – обработки, смены инструмента, быстрого возврата инструмента и обработки заготовки. Целевая функция времени обработки определяется как [5], [6]

$$T_c = t_1 + t_2 + t_3 + t_4,$$

где  $t_1$  – основное время обработки, с;  $t_2$  – время смены инструмента, с;  $t_3, t_4$  – времена, затраченные на процесс резания и на настройку системы управления электроприводов станка, с.

Стоимость резки для многоходового токарного процесса выражается как

$$C = E_{пр} t_1,$$

где  $E_{пр}$  – прямые затраты на оплату труда плюс накладные расходы, р./мин;

$$t_1 = \frac{\pi D_{ср} L}{1000 v_p S} \cdot n = \frac{\pi D_{ср} L}{1000 v_p S} \left( \frac{d_t - d_f}{d_r} \right),$$

где  $D_{ср}$  – средний диаметр заготовки, рассчитывается по начальным  $d_t$  и конечным  $d_f$  диаметрам заготовки, мм;  $d_r$  – глубина резания при грубой обработке, мм;  $L$  – общая длина инструмента, мм;  $n$  – частоты вращения шпинделя, об/мин.

На основе приведенных уравнений стоимость резки может быть выражена как

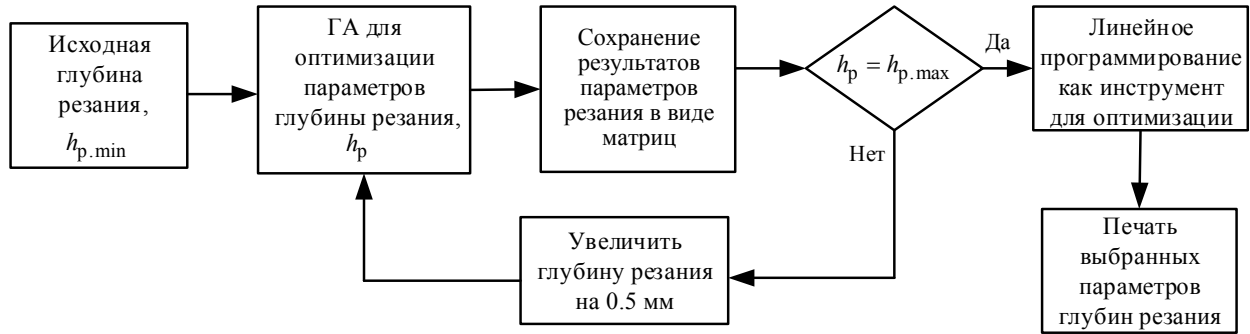


Рис. 3

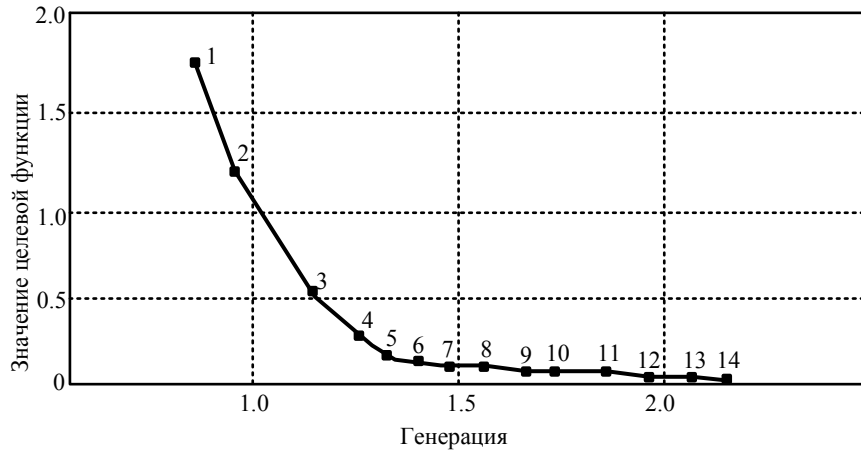


Рис. 4

$$C = E_{\text{пр}} \left[ \frac{\pi D_{\text{ср}} L}{1000 v_p S} \left( \frac{d_t - d_f}{d_r} \right) + \frac{\pi D_{\text{ср}} L}{1000 v_p S} \right].$$

Рассмотрим процедуру оптимизации параметров механической обработки детали. Исходные данные для проведения оптимизации были взяты из технической документации токарного станка модели СМ1761Ф3; параметры, относящиеся к типу обрабатываемого материала детали, – из справочника [7]. Мощность главного привода (шпинделя) токарного станка  $P_{\text{ш}} = 10$  кВт, максимальная и минимальная силы резания  $F_{z \text{ max}} = 4300$  Н и  $F_{z \text{ min}} = 2000$  Н. Заготовка имеет следующие параметры: диаметр 20 мм; длина 100 мм, материал – низколегированная сталь с  $HB = 180$ . В Matlab для оптимизации параметров процесса резания на основе ГА используются приложения Genetic Algorithm и Direct Search Toolbox [8]. При моделировании для ГА были приняты стандартные настройки. Оптимизация была проведена для диапазона глубин резания от минимального до максимального значений, которые определяются для выбранного режущего инструмента. Чтобы получить оптимальные параметры резки, было совершено несколько итераций.

Анализ показал, что в данном случае наилучшим методом оптимизации является метод бинарного линейного программирования [9]–[11]. Процесс оптимизации представлен схемой на рис. 3.

Основные параметры для настройки ГА следующие: размер популяции (20–100 особей); кодирование (выполняется с действительными числами); применен стохастический равномерный отбор; генетические операторы: равномерный кроссовер; вероятность кроссовера (0.8); частота мутаций (0.1). Условия прекращения оптимизации: 1) фиксированное число поколений (100 поколений); 2) эволюционный процесс останавливается, если лучшее решение не показало улучшения за последние 50 поколений.

В результате оптимизации выводится двоичная матрица, из которой выбирается ряд матриц, удовлетворяющих целевой функции параметров резания.

Оптимизация для каждой глубины резания выполняется отдельно с целью нахождения оптимальных параметров процесса резания. Генетический алгоритм работает до тех пор, пока не будут выполнены критерии остановки, как показано на рис. 4.

Скорость подачи ( $S$ ), мм/мин	Скорость резки ( $v_p$ ), м/мин	Время обработки ( $T_{об}$ ), мин	Мощность резания ( $P_p$ ), Вт	Усилие резания ( $F_p$ ), Н	Частоты вращения шпинделя ( $n$ ), об/мин	Глубина резания ( $h_p$ ), мм
0.90	603	4.70	16.15	1608.18	3998	1.0
0.90	588	4.72	23.59	2405.80	3987	1.5
0.89	566	4.81	29.99	3178.94	3919	2.0
0.78	518	5.62	29.96	3467.89	3669	2.5
0.72	464	6.40	29.90	3864.34	3360	3.0
0.68	420	7.11	29.99	4286.21	3109	3.5
0.77	327	7.80	29.99	5505.45	2476	4.0
0.70	320	8.44	29.99	5629.99	2483	4.5
0.40	496	9.06	29.96	3621.02	3953	5.0

Анализируя график на рис. 4, можно сделать следующие выводы:

1. От т. 1 до т. 5: наблюдается значительное снижение срока службы используемого инструмента и соответствующее увеличение общего времени работы. Следует отметить, что снижение срока службы используемого инструмента является неприемлемым, чем увеличение времени обработки детали на металлорежущих станках (около 12 %).

2. От т. 5 до т. 14: время работы увеличивается примерно на 10 %, а срок службы используемого инструмента незначительно уменьшается.

В таблице приведены оптимальные параметры процесса механической обработки и минимальные времена изготовления детали, полученные при оптимизации с помощью ГА.

Можно сделать вывод, что генетический алгоритм – это современный метод нахождения оптимальных значений функций со многими переменными, в частности для оптимизации процесса токарной обработки. Данный подход позволяет реализовать процедуру определения оптимальных технологических параметров обработки для конкретной геометрии изделия быстро и с высокой точностью. Оптимизация параметров обработки для различных процессов предназначена для повышения эффективности обработки за счет сокращения затрат, расходуемых на производственные процессы в соответствии с современными экономическими потребностями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Al-Aomar R., Al-Okaily A. A GA-based parameter design for single machine turning process with high-volume production // *Computers & Industrial Engineering*. 2007. № 50. P. 317–337.
- Cus F., Balic J. Optimization of cutting process by GA approach // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2003. № 19. P. 113–121.
- Безъязычный В. Ф., Аверьянов И. Н., Кордюков А. В. Расчет режимов резания: учеб. пособие / РГАТА. Рыбинск, 2009.
- Shin Y. C., Joo Y. S. Optimization of machining conditions with practical constraints // *Intern. J. of Production Research*. 1992. Vol. 30, № 12. P. 2907–2919.
- Agapiou J. S. The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 2: Multipass operations // *J. Eng. Ind. Trans. ASME*. 1992. № 114. P. 508–513.
- Deep K., Thakur M. A new mutation operator for real coded genetic algorithms // *Appl. Math. Comput.* 2007. № 193. P. 21–23.
- Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985.
- Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. СПб.: РИЦ ГУАП, 2008.
- Matousek J., Gärtner B. Understanding and using linear programming. Springer, 2006.
- Elaouda S., Teghemb J., Bouaziz B. Genetic algorithms to solve the cover printing problem // *Computers & Operations Research*. 2007. № 34. P. 3346–3361.
- Елисеев В. Г., Козырева Н. А. Применение линейного программирования в итерационной процедуре планирования загрузки оборудования // *Науч. сессия МИФИ-2006: сб. науч. тр.: в 16 т. Т. 11. Инновационные проекты, студенческие идеи, проекты, предложения. М.: Изд-во МИФИ, 2006.*

I. S. Nosirov, A. M. Belov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A CNC LATHE CUTTING PROCESS USING A GENETIC ALGORITHM

*The optimization of machining parameters on a lathe and the use of artificial intelligence. Determining the optimal cutting parameters is important for economical machining and plays an important role in reducing machining errors and maintaining the stability of the machine tooling. To obtain greater efficiency and productivity of the machine, it is necessary to obtain optimal parameters of the cutting process. To find the optimal parameters of the cutting process, a genetic algorithm (GA) was used. Having analyzed the existing research methods, it was revealed that when predicting the shape and surface roughness of parts during machining, the use of GA is effective. The optimization of the parameters of the machining process for various cutting depths is considered. The optimal processing parameters (cutting depth, feed rate to improve surface roughness) are determined. The minimum cost of cutting was also obtained.*

**Turning, cutting process parameters, cutting conditions, optimization, genetic algorithm**

---

УДК 621.311.23:629.1

Ю. Н. Хижняков, А. А. Южаков  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## Векторно-матричное нечеткое управление частотой вращения свободной турбины турбовинтового двигателя

*Методы теории нечетких множеств (нечеткой логики) нашли широкое применение в задачах управления. Однако при использовании аппарата нечеткой логики необходимо выбирать модели нечетких логических операций, исходя из эмпирических соображений. Это затрудняет построение алгоритмов решения конкретных задач. Применение «классических» операций оправдано только для решения простых задач и не требует большого количества правил. Предлагается применение векторных моделей, направленных на простоту реализации, высокое быстродействие и расширение области применения. Использование матричного аппарата заменяет проекции вектора лингвистической переменной (терм-множество) нечеткими векторами. Основные операции над нечеткими векторами приведены в работах М. А. Марценюка, на базе которых рассмотрено проектирование векторного нечеткого регулятора частоты вращения турбовинтового двигателя. Новым является применение синглтонной базы для активации нечетких векторов фаззификатора, а также метода разности площадей как метода дефаззификации.*

**Предикаты, продукционные правила, нечеткая прямая импликация, нечеткая обратная импликация, нечеткий векторный регулятор, турбовинтовой двигатель**

В настоящее время основное направление развития прикладных задач ориентируется на разработку моделей трудно формализуемых сложных систем, состоящих из большого числа взаимодействующих компонентов. Нечеткая логика есть математический аппарат теории нечетких множеств, моделирующий человеческие рассуждения, что позволяет применять ее для построения алгоритмов управления сложными системами на языке высокого уровня.

Методы нечеткой логики нашли многочисленные применения в задачах управления, отно-

сящихся к разным областям человеческой деятельности: в промышленности [1]–[3], на транспорте [4] и многим другим. Понятия нечеткой логики и представления о нечетких множествах были впервые введены в работах Л. Заде [5]. В дальнейшем было разработано несколько вариантов реализации нечетких логических операций и основанных на них алгоритмов, а также способов получения информации с использованием нечетких систем [6]–[9].

Однако при использовании аппарата нечеткой логики возникает необходимость выбора моделей