

Степанов М. С.,
Иванова М. С.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫБОРА НАИВЫГОДНЕЙШИХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Выполнен анализ существующих рекомендаций по выбору режимов резания для комбинированного осевого инструмента. Предложена математическая модель выбора наиболее выгодных режимов резания для комбинированного осевого инструмента, на основе решения минимаксной задачи с техническими ограничениями. В качестве целевых функций приняты среднеквадратическое отклонение от скорости резания, среднеквадратическое отклонение от подачи на оборот и время обработки.

Ключевые слова: комбинированный осевой инструмент, минутная подача, частота вращения, скорость резания, производительность.

1. Введение

Обработка отверстий является одной из сложных и трудоемких технологических операций. Получить отверстие необходимой точности труднее, чем наружные поверхности тел вращения с аналогичными техническими требованиями. Как правило, обработку выполняют стандартными мерными осевыми инструментами: сверлами, зенкерами, развертками и другими концевыми мерными инструментами. Для повышения производительности обработки отверстий за счет совмещения технологических переходов и сокращения вспомогательного времени достаточно давно используют комбинированный осевой инструмент (КОИ), ступени которого, в зависимости от вида концентрации операций, могут работать параллельно, последовательно или последовательно-параллельно.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Как показал анализ литературы, оптимизацией режимов резания для стандартных осевых инструментов занимались достаточно тщательно. В работе [1] автором были сформированы основные технические ограничения при математическом моделировании процесса резания металлов. В работе [2] предложена математическая модель определения оптимальных режимов резания для труднообрабатываемых сталей по критерию минимума затрат и основанная на моделях, описывающих стойкость инструмента. Автором [3] установлена связь между скоростями резания, обеспечивающими максимальную производительности и минимальную себестоимость обработки и основанную на уравнении Тейлора, при этом основным критерием оптимальности является время смены инструмента. Эта методика получила дальнейшее развитие в работе [4]. Авторы работ [5, 6] считают, что повышение производительности достигается как за счет сокращения времени обработки, так и времени перемещения инструмента. Поэтому их основные исследования направлены на разработку оптимального

маршрута передвижения режущего инструмента. Однако математические модели для определения оптимальных режимов резания при обработке комбинированным осевым инструментом практически отсутствуют.

Режимы резания при обработке вышеуказанным инструментом (для КОИ) с параллельной работой ступеней, принято выбирать по лимитирующим ступеням [7, 8]. Как правило, лимитирующей ступенью при выборе подачи принимают ступень с минимальным диаметром, а при выборе скорости резания — с максимальным диаметром. В работе [9] автор предлагает выполнять предварительный выбор лимитирующей ступени по максимальному пути резания, осуществляемому ступенью, а окончательный выбор — по ресурсу инструмента за период его стойкости.

В работе [10] было получено, что назначение режимов резания по лимитирующим степеням ведет к неполному использованию потенциальных возможностей других ступеней КОИ, 1,1–1,5 раза по подаче и 1,5–2,5 — по скорости резания в зависимости от соотношения диаметров и длин ступеней. В работе [11] авторами была предпринята попытка повышения использования ресурсов нелимитирующих ступеней КОИ путем назначения подачи по средневзвешенному диаметру. Однако, повышение величины подачи требует уменьшения скорости резания, что может привести к потере производительности.

Таким образом, необходимо выполнить поиск возможностей для повышения использования ресурсов всех ступеней КОИ как по подаче, так и по скорости резания.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — технологический процесс обработки отверстий комбинированным осевым инструментом.

Целью статьи является определение направлений повышения производительности и обеспечение требуемого качества обработки отверстий в деталях гидропневмоаппаратуры при обработке КОИ за счет решения

задачи теоретического обоснования и разработки математической модели выбора наивыгоднейших режимов резания КОИ с учетом производственных условий.

Исходными данными для решения указанной выше задачи являются: набор ступеней инструмента, для которых известны диаметры – тип инструмента для обработки отверстия; материал режущей части; обрабатываемый материал; параметры оборудования, на котором производится обработка.

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: найти такую частоту вращения шпинделя и подачу, которые обеспечат минимальное время обработки, минимальный разброс подач по ступеням, минимальный разброс скоростей по ступеням. Последние два параметра обеспечивают максимальную производительность КОИ, за счет максимального использования возможностей каждой ступени инструмента.

При этом необходимо учитывать ограничения по точности обработки и по возможностям структурных элементов технологической системы.

4. Разработка математических моделей оптимизации режимов резания для комбинированного осевого инструмента

Рассмотрим решение поставленной задачи в общем виде для всех типов комбинированных инструментов. Для этого определим следующие оценочные функции:

1) минимальное среднеквадратическое отклонение от средней скорости:

$$f_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (V_i - \bar{V})^2, \tag{1}$$

где V_i – скорость резания на каждой ступени инструмента; \bar{V} – средняя скорость резания по всем ступеням; m – количество ступеней инструмента;

2) минимальное среднеквадратическое отклонение от средней подачи на оборот:

$$f_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (S_{0i} - \bar{S})^2, \tag{2}$$

где S_{0i} – подача на оборот для каждой ступени инструмента; \bar{S} – средняя подача на оборот по всем ступеням;

3) максимальная производительность в единицу времени:

$$f_3 = \frac{1}{\min_{S_m \in SMI} \{Sm\}}, \tag{3}$$

где SMI – множество минутных подач, определяемых ступенями инструмента.

Решаем задачу однокритериальной оптимизации для каждой из функций с учетом наложенных технических ограничений: по режущей способности инструмента; по

допустимой мощности станка; по прочности механизма подач; по максимальному крутящему моменту; по разбивке отверстия; по кинематике станка и т. д.

Математические модели оптимизации реализованы в системе MathCAD (рис. 1, 2) в виде отдельных файлов. Здесь для поиска оптимума используется метод Квази-Ньютона. Начальные точки для все трех случаев одинаковы: частота вращения 200 об/мин; подача 0,2 об/мин (40 мм/мин). Сменное задание предполагает изготовление 300 деталей. В табл. 1 представлены результаты расчета наивыгоднейших режимов резания по предлагаемым математическим моделям оптимизации режимов резания для трехступенчатого сверла с диаметрами ступеней $d_1/d_2/d_3 = 10/20/30$ мм.

Из табл. 1 видно, что наиболее производительные режимы резания определены по функции максимальной производительности. Полученные результаты для однокритериальных задач позволяют предположить, что потенциально существует какое-то решение, удовлетворяющее всем трем оценочным функциям. Следовательно, можно сформулировать решение задачи выбора рациональных режимов резания для комбинированных инструментов, как минимаксную задачу с ограничениями.

Согласно формальной постановке задачи определим три функции, составляющие вектор оптимизации: среднеквадратичное отклонение от средней скорости резания; среднеквадратичное отклонение от подачи на оборот; время обработки.

Целевая функция (минимальное отклонение от средней скорости резания)

$$f(nl) := \frac{1}{\text{rows}(nl)} \cdot \sum_{i=0}^{\text{rows}(nl)-1} \left[\text{ffv} \left[(nl^{(0)})_i, D_i \right] - \text{mean} \left(\overline{\text{ffv}(nl^{(0)}, D)} \right) \right]^2$$

Начальные значения независимых переменных: $nl := \begin{pmatrix} 200 & 0.2 \\ 200 & 0.2 \\ 200 & 0.2 \end{pmatrix}$

$fym(sl) := sl^{ym}$ $fyp(sl) := sl^{yp}$

$ff(nf, sf) := nf \cdot sl^{\text{Brezan}(\text{mater}, \text{tool}, sf)_1}$

$ffr(m) := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(m) - 1 \\ \text{rez}_i \leftarrow \text{ff} \left[(m^{(0)})_i, (m^{(1)})_i \right] \\ \text{rez} \end{cases}$

Технические ограничения: Given

(1) : на режущую способность инструмента

$ffr(nl) \leq \text{Brezan}(\text{mater}, \text{tool}, nl^{(1)})_0$

(2) по допустимой мощности: $\overline{(nl^{(0)} \cdot fym(nl^{(1)}))} \leq B4(D)$

(3) по прочности механизма подач: $\overline{fyp(nl^{(1)})} \leq B5(D)$

(4) по максимальному крутящему моменту: $\overline{fym(nl^{(1)})} \leq B6(D)$

(5) по разбивке отверстия: $\overline{fyp(nl^{(1)})} \leq B7$

Рис. 1. Программа оптимизации режимов резания для трехступенчатого сверла по минимальному отклонению от средней скорости резания

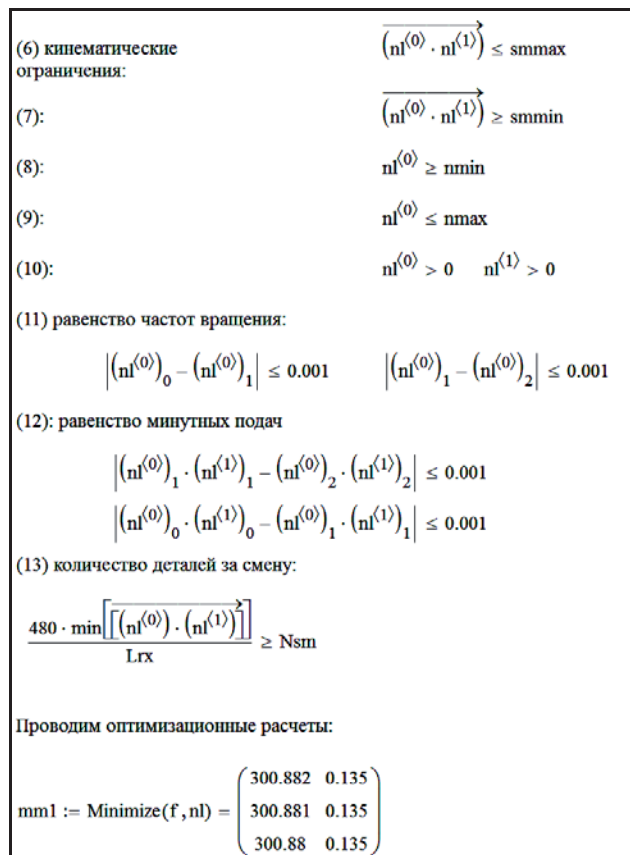


Рис. 2. Продолжение программы оптимизации режимов резания в системе MathCAD

Таблица 1

Результаты расчета режимов резания

Режим резания	Целевая функция		
	Среднеквадратическое отклонение от подачи	Среднеквадратическое отклонение от скорости	Максимальная производительность
Подача S , мм/об	0,134	0,135	0,135
Частота вращения n , об/мин	322	300	385
Минутная подача	43	40,5	51,95

Целевая функция тогда будет представлена:

$$\min_{x \in X} \max_{f \in F} \{f(x)\}, \tag{4}$$

где $X = \{x_i : x_i \in C, C = SM \times N, i = \overline{1, |C|}\}$ — множество сочетаний частоты вращения и подачи; $F = \{f_1, f_2, f_3\}$ — множество функций, для которых находят минимальные значения; $SM = \{Sm^{\min}, Sm_i, \dots, Sm^{\max}\}$ — множество минутных подач по станку; $N = \{n^{\min}, n_i, \dots, n^{\max}\}$ — множество частот вращения по станку.

Подставив функции (1), (2), (3) в виде (4), получим:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (V_i - \bar{V})^2, \\ f_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (So_i - \bar{S})^2, \\ f_3 = \frac{1}{\min_{sm \in SMI} \{Sm\}}. \end{cases} \tag{5}$$

Таким образом, первые две целевые функции определяют наиболее сбалансированные режимные параметры относительно среднего значения.

Набор технических ограничений (6) зависит от требований к обработанному ступенчатому отверстию и производственных условий, поэтому опишем их в общем виде:

$$\begin{cases} V_i \leq [V]_i, i = \overline{1, m}, \\ So_i \leq [So]_i^j, j = \overline{1, k}, \\ Sm^{\min} \leq Sm \leq Sm^{\max}, \\ n^{\min} \leq n \leq n^{\max}, \\ n_p = n_y, p = \overline{1, m}, y = \overline{1, m}, \end{cases} \tag{6}$$

где m — количество ступеней инструмента; k — количество ограничений по подачам на оборот для каждой ступени; $[V]_i$ — допустимая скорость резания с учетом производственных условий для отдельной ступени; $[So]_i^j$ — допустимая подача на оборот с учетом производственных условий для отдельной ступени; Sm^{\min}, Sm^{\max} — допустимые минутные подачи по станку; n^{\min}, n^{\max} — допустимые частоты вращения по станку; $n_p = n_y$ — условие, указывающее на то, что для всех ступеней КОИ с параллельной работой частоты вращения равны.

Для перевода минутной подачи в подачу на оборот и обратно установим следующие подстановки (7):

$$\begin{cases} fso(Sm, n) = \frac{Sm}{n} (1), \\ rfso(So, n) = So \cdot n (2), \\ V(d, n) = \frac{\pi d n}{1000} (3), \\ rv(d, V) = \frac{1000V}{\pi d} (4). \end{cases} \tag{7}$$

Тогда (5) преобразуем в (8):

$$\begin{cases} f(d, n)_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (V(d, n)_i - \bar{V})^2, \\ f(Sm, n)_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (fso(Sm, n)_i - \bar{S})^2, \\ f(Sm)_3 = \frac{1}{\min_{sm \in SMI} \{Sm\}}. \end{cases} \tag{8}$$

Технические ограничения (6) в этом случае будут преобразованы к (9):

$$\begin{cases} V(d_i, n_i) \leq [V]_i, i = \overline{1, m}, \\ fso(Sm_i, n_i) \leq [So]_i^j, j = \overline{1, k}, \\ Sm^{\min} \leq Sm \leq Sm^{\max}, \\ n^{\min} \leq n \leq n^{\max}, \\ n_p = n_y, p = \overline{1, m}, y = \overline{1, m}. \end{cases} \tag{9}$$

Для решения минимаксной задачи необходимо масштабировать независимые переменные: подачу Shm

и частоту nh в диапазон от 0 до 1, согласно преобразованиям (10):

$$\begin{cases} shm(Sm, Sm^{\max}, Sm^{\min}) = \frac{Sm^{\max} - Sm}{Sm^{\max} - Sm^{\min}}, \\ nh(n, n^{\max}, n^{\min}) = \frac{n^{\max} - n}{n^{\max} - n^{\min}}, \\ rshm(Shm, Sm^{\max}, Sm^{\min}) = Sm^{\max} - Shm \cdot (Sm^{\max} - Sm^{\min}), \\ mh(nh, n^{\max}, n^{\min}) = n^{\max} - nh \cdot (n^{\max} - n^{\min}). \end{cases} \quad (10)$$

Выполнив соответствующие преобразования формулы (8) и (9) получают вид соответственно (11) и (12):

$$\begin{cases} f(d, mh(nh, n^{\max}, n^{\min}))_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (V(d, n)_i - \bar{V})^2, \\ f(rshm(Shm, Sm^{\max}, Sm^{\min}), mh(nh, n^{\max}, n^{\min}))_2 = \\ = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (fso(Sm, n)_i - \bar{S})^2, \\ f(rshm(Shm, Sm^{\max}, Sm^{\min}))_3 = \frac{1}{Sm}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} V(d_i, mh(nh, n^{\max}, n^{\min}))_i \leq [V]_i, i = \overline{1, m}, \\ fso \left(\begin{matrix} rshm(Shm, Sm^{\max}, Sm^{\min})_i, \\ mh(nh, n^{\max}, n^{\min})_i \end{matrix} \right)_i \leq [So]_i^j, j = \overline{1, k}, \\ Sm^{\min} \leq rshm(Shm, Sm^{\max}, Sm^{\min}) \leq Sm^{\max}, \\ n^{\min} \leq mh(nh, n^{\max}, n^{\min}) \leq n^{\max}, \\ mh(nh, n^{\max}, n^{\min})_p = mh(nh, n^{\max}, n^{\min})_y, p = \overline{1, m}, y = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, получена обобщенная математическая модель (11), позволяющая с учетом технических ограничений (12) находить такие подачу и частоту вращения инструмента, которые обеспечат максимальное использование ресурсов нелимитирующих ступеней комбинированного осевого инструмента.

5. Выводы

В результате выполненных исследований была разработана математическая модель выбора наиболее оптимальных режимов резания для КОИ с учетом производственных условий. Полученная модель позволяет находить такое сочетание параметров режима резания, которое удовлетворяет всем трем условиям: минимальное среднее квадратическое отклонение от средней скорости резания; минимальное среднее квадратическое отклонение от средней подачи на оборот и минимальное время обработки при этом, обеспечивая требуемые параметры точности обработки отверстий.

Литература

- Горанский, Г. К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ [Текст] / Г. К. Горанский, Е. В. Владимиров, Л. Н. Ламбин. — М.: Машиностроение, 1970. — 224 с.
- Смагин, Г. И. Оптимизация режимов сверления по критерию минимума затрат с использованием двухфакторных стойкостных моделей [Текст] / Г. И. Смагин, В. С. Кар-

манов // Сборник научных трудов НГТУ. — Новосибирск, 1999. — № 2(15). — С. 57–71.

- Coppini, N. L. Cutting conditions optimization based on expert system 3th CEM-NNE [Text] / N. L. Coppini, M. C. A. Batochio. — Belém, Brazil, 1994. — P. 564–567.
- Coppini, N. L. Cutting conditions optimisation in machining of CFRP with cemented carbide Tool [Text] / N. L. Coppini, J. R. Ferreira, G. W. A. Miranda // ICCE/4-Fourth International Conference on Composites Engineering. — Hawaii, USA, 1997. — P. 6–11.
- Parker, S. Optimization of hole-making operations: a tabu-search approach [Text] / S. Parker, F. Kolahan, M. Liang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2000. — Vol. 40, № 12. — P. 1735–1753. doi:10.1016/s0890-6955(00)00024-9
- Qudeiri, J. A. Optimization of operation sequence in CNC machine tools using genetic algorithm [Text] / J. A. Qudeiri, H. Yamamoto, R. Ramli // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. — 2007. — Vol. 1, № 2. — P. 272–282. doi:10.1299/jamdsm.1.272
- Жарликов, Н. В. Комбинированные режущие инструменты [Текст] / Н. В. Жарликов. — Свердловск: Машгиз, Урало-Сибирское отд., 1961. — 78 с.
- Барановский, Ю. В. Режимы резания металлов [Текст]: справ. / Ю. В. Барановский. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 1972. — 408 с.
- Мальшко, И. А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации) [Текст] / И. А. Мальшко. — Донецк: ПКТИ, 1996. — 135 с.
- Карпуть, В. Є. Аналіз існуючих рекомендацій щодо призначення режимів різання комбінованими осевими інструментами [Текст] / В. Є. Карпуть, М. С. Іванова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: НТУ «ХПІ», 2010. — № 49. — С. 92–96.
- Карпуть, В. Є. Інтенсифікація процесів механічної обробки [Текст]: монографія / В. Є. Карпуть, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін. — Суми: Сумський державний університет, 2012. — 436 с.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИБОРУ НАЙВИГІДНІШИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ КОМБІНОВАНИМ ОСЕВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Виконано аналіз існуючих рекомендацій по вибору режимів різання для комбінованого осевого інструменту. Запропоновано математичну модель вибору найвигодніших режимів різання для комбінованого осевого інструменту, на основі вирішення мінімаксної задачі з технічними обмеженнями. В якості цільових функцій використані середньоквадратичне відхилення від швидкості різання, середньоквадратичне відхилення від подачі на оберт та час обробки.

Ключові слова: комбінований осевий інструмент, хвилинна подача, частота обертання, швидкість різання, продуктивність.

Степанов Михайл Сергеевич, доктор технических наук, профессор, кафедра гидропневмоавтоматики и гидропривода, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Іванова Марина Сергіївна, асистент, кафедра технології машиностроєння та металорезаючих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: ivamari85@rambler.ru.

Степанов Михайло Сергійович, доктор технічних наук, професор, кафедра гідропневмоавтоматики та гідропривода, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Іванова Марина Сергіївна, асистент, кафедра технології машинобудування та металорезаючих верстатів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Stepanov Mykhajlo, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Ivanova Maryna, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: ivamari85@rambler.ru