

УДК 004.89 : 681.516.75

В. В. ЛИМАРЕНКО, И. П. ХАВИНА

Национальный технический университет «ХПИ», Украина

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ОПЕРАЦИИ ТОЧЕНИЯ

Показана постановка и решение с применением системы интеллектуальной поддержки принятия решений (СИППР) задачи оптимизации параметров обработки металлов при операции точения. Задача ставилась в ходе разработки СИППР, позволяющей автоматизировать разработку технологического процесса (ТП), оптимизировать и управлять им. Отсутствие таких систем интеллектуальной поддержки принятия решений не позволяет предприятиям в полной мере использовать возможности высокотехнологичного оборудования и снижает эффективность и прибыльность производства по причине нерационального использования станочного парка, материальных и инженерных ресурсов предприятий. Задачи синтеза оптимального технологического процесса решаются в два этапа: первый – структурная оптимизация технологического процесса (синтез оптимальной структуры ТП); второй – параметрическая оптимизация технологического процесса (определение оптимальных режимов операционных параметров для всех операций технологического процесса). Задача оптимизации параметров обработки металлов при операции точения является одной из подзадач второго этапа синтеза оптимальной структуры технологического процесса механообработки металлов. Задача решена с учетом уровня накапливаемого износа по задней поверхности инструмента, уровня КПД станка, зависящего от режимов работы и периода экономически-эффективной стойкости инструмента. Задача решена в многокритериальной постановке с учетом трех целевых функций: себестоимость операций, удельные энергозатраты на операции и производительность операции и десяти существующих технических и технологических ограничений. Решение получено в виде Парето-оптимального. В ходе решения применялись искусственная нейронная сеть и генетический алгоритм FFGA. Такой подход позволяет решать задачи оптимизации реального производства. Показаны: постановка задачи и ее практическое решение, структура разработанной системы интеллектуальной поддержки принятия решений, приведены практические результаты решения поставленной задачи, показана верификация полученных результатов. Показана полученная с помощью СИППР технологическая карта для обработки поверхности детали «Корпус фильтра» привода генератора ГП-21.

Ключевые слова: СИППР, оптимизация параметров операции точения, накапливаемый износ инструмента, экономически-эффективная стойкость инструмента, многокритериальная оптимизационная задача, Парето-оптимальное решение.

Введение

В последние годы проводится большое количество исследований, направленных на повышение эффективности технологических процессов обработки металлов резанием (точение, фрезерование, сверление и т.д.). Одним из основных направлений совершенствования технологических процессов обработки резанием является применение приложений автоматизированного планирования и интеллектуальных систем управления производством, т.к. совершенствование технологических процессов обработки резанием за счет замены оборудования или инструмента является достаточно затратным и зачастую экономически невыгодным. Основным требованием, предъявляемым к системам интеллектуального управления производством, является использование современных компьютерных технологий для

формирования и поддержки автоматизированного процесса планирования производства, оптимальное использование оборудования, эффективное прогнозирование операционного времени и наличие альтернативных вариантов ТП [1-3].

ТП механической обработки деталей резанием должен планироваться и выполняться таким образом, чтобы посредством применения наиболее рациональных и экономичных способов обработки удовлетворялись требования к качеству деталей (точность обработки, шероховатость поверхности, взаимное расположение осей и поверхностей, правильность контуров и т.д.), обеспечивающему правильную работу изготавливаемых изделий. Возможности современных компьютерных технологий играют значительную роль в удовлетворении этих требований. Одними из таких возможностей являются системы интеллектуальной поддержки принятия ре-

шений, позволяющие автоматизировать разработку технологического процесса и управление им [1-3]. Отсутствие таких интеллектуальных систем поддержки принятия решений не позволяет предприятиям в полной мере использовать возможности высокотехнологичного оборудования и снижает эффективность и прибыльность производства по причине нерационального использования станочного парка, материальных и инженерных ресурсов предприятий [1-4].

Особо актуально данная проблема стоит на предприятиях, имеющих мелко- и среднесерийное производство. При этом для данных предприятий характерно применение современного дорогостоящего оборудования и инструментальных комплексов, большое разнообразие используемых процессов механообработки, использование одного и того же оборудования для производства целого ряда изделий, имеющих совершенно разные технические параметры и размеры партий; высокие требования к качеству деталей и изделий в целом; сложность конфигурации деталей; широкое применение труднообрабатываемых и дорогих материалов; жесткий контроль качества; сравнительно частая смена объектов производства [1].

В то же время на машиностроительных предприятиях применяются различные программные комплексы для синтеза технологических процессов механообработки.

Среди наиболее широко применяемых систем можно выделить следующие: AllFusion Process Modeler («Computer Associates»), Arena («System Modeling Corporation»), Вертикаль (ОАО «АС-КОН»), Timeline («SDI-Solution»), TechnologiCS («CSoft Development»), ADEM (группа компаний «ADEM»), R/3 («SAP SE»), BAAN («BAAN IV»).

Основными недостатками перечисленных систем является их высокая стоимость, сложность для использования конечным пользователем, длительное время внедрения (вплоть до 2-х лет), избыточное количество дополнительных функциональных возможностей, которые не относятся непосредственно к технологическим процессам (элементы бухгалтерского учета, логистики и т.п.) и необходимость переобучения персонала [1, 4].

С учетом этих аспектов задача создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений для автоматизации синтеза оптимального технологического процесса изготовления изделий методом механообработки является актуальной. К функциям таких СИППР относятся разработка оптимального технологического процесса изготовления изделия; формирование технологической документации; расчёт затрат времени и себестоимости операции;

определение трудоемкости изготовления изделия; расчёт расхода материалов [1, 2].

Задачи синтеза оптимального технологического процесса решаются в два этапа:

– первый – структурная оптимизация технологического процесса (синтез оптимальной структуры ТП);

– второй – параметрическая оптимизация технологического процесса (определение оптимальных режимов операционных параметров для всех операций технологического процесса).

Структурная оптимизация технологического процесса направлена на создание структуры в виде оптимальной последовательности операций технологического процесса, а целью параметрической оптимизации является поиск оптимальных режимов выполнения операции с учетом всех ограничивающих факторов [3-5].

Пренебрежение оптимизацией структуры технологического процесса может привести к значительному ухудшению технологического процесса, его удорожанию и снижению производительности производства. Известно [4, 5], что эффект от оптимального выбора структуры ТП превосходит эффект, полученный от оптимизации параметров отдельных элементов, входящих в технологический процесс. Это связано с тем, что при ошибочном выборе структуры ТП даже самые современные методы параметрической оптимизации режимов металлообработки не смогут компенсировать потери производительности. В свою очередь пренебрежение параметрической оптимизацией операций может привести к тому, что даже идеальная, на первый взгляд, структура ТП может оказаться недостаточно эффективной [4, 5].

Процесс резания металлов характеризуется большим количеством параметров и факторов, которые имеют сложную связь и взаимное влияние. Все параметры условно можно разделить на входные и выходные. К входным параметрам можно отнести те, которые непосредственно влияют на характеристики получаемых изделий, а выходными считать те, которые являются непосредственными характеристиками изделия, получаемого в результате механообработки. Учитывая количество параметров и факторов, входящих в процесс, задачу параметрической оптимизации процессов механообработки металлов резанием можно считать сложной многокритериальной многопараметрической оптимизационной задачей (МОЗ).

1. Постановка задачи

В работе выполнена постановка и найдено решение практической задачи оптимизации операции

онных параметров для операций точения детали «Корпус фильтра», являющейся составной частью привода-генератора модели ГП-21.

Задача расчета оптимальных режимов резания решается путем параметрической оптимизации процесса механообработки изделия на каждой операции технологического процесса. Оптимальным режимом резания является такое сочетание глубины t , подачи S и скорости резания V , при котором обработка выполняется наиболее эффективно при соблюдении всех требований к точности, шероховатости и качеству обработанных поверхностей с учетом технологических возможностей оборудования.

Особенностью постановки задачи в работе является то, что при решении задачи оптимизации, учитывается накапливаемый износ по задней поверхности инструмента – h_3 . Такой подход позволяет создать для операций резания математическую модель максимально приближенную к реальной физической модели процесса. Также при решении оптимизационной задачи классический период стойкости инструмента T заменен на период экономически-эффективной стойкости инструмента $T_{эф}$, который определяется, как сумма времени эффективного использования инструмента при изготовлении оптимальной партии деталей с учетом изменений режимов резания в зависимости от изменения уровня износа инструмента и изменения $\eta_{ст}$ – коэффициента полезного действия станка, зависящего от режимов его работы.

При оптимизации параметров операций точения учитывалось десять технологических ограничений, которые сформированы на основании работ [6, 7].

Ограничение 1. По мощности электродвигателя привода главного движения станка $N_{дв}$.

$$N_{дв} = \frac{F_z V}{60 \cdot 10^3 \eta_{ст}} \leq N_{дв.пасп}, \quad (1)$$

где $N_{дв}$ – потребляемая мощность электродвигателя станка, кВт;

F_z – тангенциальная сила резания, Н;

$\eta_{ст} = \eta_{дв} \eta_k$ – коэффициент полезного действия станка, где $\eta_{дв}$ – КПД двигателя станка, %, η_k – КПД кинематической цепи станка, %;

$N_{дв.пасп}$ – предельная паспортная потребляемая мощность электродвигателя станка, кВт.

Ограничение 2. По минимальной скорости операции резания

$$V_{min} \leq V, \quad (2)$$

где V_{min} – минимальная скорость оборотов инструмента на станке, м/мин.

Ограничение 3. По максимальной скорости операции резания

$$V \leq V_{max}, \quad (3)$$

где V_{max} – максимальная скорость оборотов инструмента на станке, м/мин.

Ограничение 4. По минимальной скорости подачи операции резания

$$S_{min} \leq S, \quad (4)$$

где S_{min} – минимальная допустимая скорость подачи станка, мм/мин.

Ограничение 5. По максимальной скорости подачи операции резания

$$S \leq S_{max}, \quad (5)$$

где S_{max} – максимальная допустимая скорость подачи станка, мм/мин.

Ограничение 6. По прочности режущего инструмента $\sigma_{и}$.

$$\sigma_{max} = \frac{F_z l_{и}}{W} \leq [\sigma_{и}], \quad (6)$$

$$[\sigma_{и}] = \frac{\sigma_{о.н.}}{k_{з.п}}, \quad (7)$$

где $l_{и}$ – длина державки резца, мм;

$[\sigma_{и}]$ – допускаемое напряжение материала державки резца, МПа;

W – момент сопротивления сечения державки резца, мм³;

$k_{з.п}$ – коэффициент запаса прочности;

$\sigma_{о.н.}$ – опасное напряжение для материала державки, МПа.

Ограничение 7. По жесткости инструмента $f_{и}$.

$$f_{и} = \frac{F_z l_{и}^3}{3E_{и} I_{и}} \leq f_{ди}, \quad (8)$$

где $f_{и}$ – стрела прогиба державки резца, мм;

$f_{ди}$ – допустимая стрела прогиба державки резца, мм;

$E_{и}$ – модуль упругости материала державки, Н/мм²;

$I_{И} = \frac{B_{Д}H_{Д}^3}{12}$ – момент инерции сечения державки резца, мм⁴;

$B_{Д}$ – ширина прямоугольного сечения державки резца, мм;

$H_{Д}$ – высота прямоугольного сечения державки резца, мм.

Ограничение 8. По жесткости заготовки f_3 .

$$f_3 = \frac{F_y l_3^3}{kE_3 I_3} \leq f_{3,Д}, \quad (9)$$

где f_3 – стрела прогиба заготовки, мм;

F_y – сила, действующая в направлении поперечной подачи, Н;

l_3 – длина заготовки, мм;

$f_{3,Д}$ – допустимая стрела прогиба заготовки, мм;

k – коэффициент, зависящий от способа установки заготовки: $k = 3$ – деталь закреплена в патроне; $k = 70$ – деталь закреплена в центрах; $k = 130$ – деталь закреплена в патроне с поджатием задним центром;

E_3 – модуль упругости материала заготовки, МПа;

$I_3 = 0,05 \cdot D^4$ – момент инерции поперечного сечения заготовки, мм.

Ограничение 9. По прочности механизма продольной подачи станка $F_{X доп}$

$$F_x \leq F_{X доп}, \quad (10)$$

где F_x – осевая сила резания, Н;

$F_{X доп}$ – паспортная осевая сила резания, Н.

Ограничение 10. По требуемой шероховатости обработанной поверхности R_a .

$$R_a(V, S, t, h_3) \leq R_{a max}, \quad (11)$$

где R_a – фактическая шероховатость поверхности при заданных операционных параметрах и фактическом износе инструмента, мкм;

$R_{a max}$ – максимально допускаемая шероховатость поверхности, мкм.

Аналитический вид функций $R_a = f_1(V, S, t, h_3)$ и $h_3 = f_2(V, S, t)$, описывающий их с достаточной точностью трудно формализуем. Поэтому для вычисления R_a и h_3 в работе применена обученная на базе ограниченного количества экспериментальных

данных нейронная сеть перцептрон с двумя скрытыми слоями [8, 9]. Следует также отметить, что усилия резания F_x, F_y, F_z зависят от накапливаемого износа режущего инструмента по задней поверхности [6-10].

В работе для параметрической оптимизации операции точения применяются три целевые функции: себестоимость операции A , энергозатраты (потребляемая мощность) \mathcal{E} и производительность операций Q , что позволяет решать комплексно задачи реального производства.

Целевая функция 1. Себестоимость операции A .

$$A(V, S) = \frac{l_3}{S(V, t, h_3(V, S, t, R_a))} \cdot (a_{раб} + a_{эксп} + \frac{e}{T_{ЭФ}(V, S, t, h_3(V, S, t, R_a))} + \frac{q_3 F_z(V, S, t, h_3(V, S, t, R_a))}{6 \cdot 10^4 \eta_{ст}(V, S, t)} \cdot \frac{V(S, t, h_3(V, S, t, R_a))}{6 \cdot 10^4 \eta_{ст}(V, S, t)}) \Rightarrow \min, \quad (12)$$

где $a_{раб}$ – затраты на заработную плату рабочего, грн;

$a_{эксп}$ – затраты на эксплуатацию оборудования, грн;

q_3 – стоимость одного кВт/ч электроэнергии, грн.

Целевая функция 2. Удельные энергозатраты (потребляемая мощность) \mathcal{E} .

$$\mathcal{E}(V, S) = (F_z(V, S, t, h_3(V, S, t, R_a)) \cdot V(S, t, h_3(V, S, t, R_a)) / 6 \cdot 10^4 \eta_{ст}(V, S, t)) \Rightarrow \min, \quad (13)$$

Целевая функция 3. Производительность операции Q .

$$Q(V, S) = \frac{S(V, t, h_3(V, S, t, R_a))t}{l_3 \Delta} \Rightarrow \max, \quad (14)$$

где Δ – припуск, мм., при этом необходимо учитывать, что при операциях чистового конечного точения $t = \Delta$, т.к. весь припуск снимается за один проход.

Особенностью данной постановки задачи является то, что в работе используется метод расчета сил резания, предложенный в [10], что позволяет использовать значительно меньшее количество эмпирических коэффициентов, и с необходимой точностью получить результат, значительно сократив количество дорогостоящих экспериментов.

Наибольшее влияние на изменение параметров операций с течением времени оказывает величина износа инструмента по задней поверхности h_3 , т.к. то него зависит уровень сил в зоне резания, шероховатость поверхности, температурные явления, размерная точность получаемой детали и т.п. [4, 10].

2. Основная часть

Для решения задачи разработана система интеллектуальной поддержки принятия решений «Opticutt». На рис. 1 показана архитектура программного комплекса.

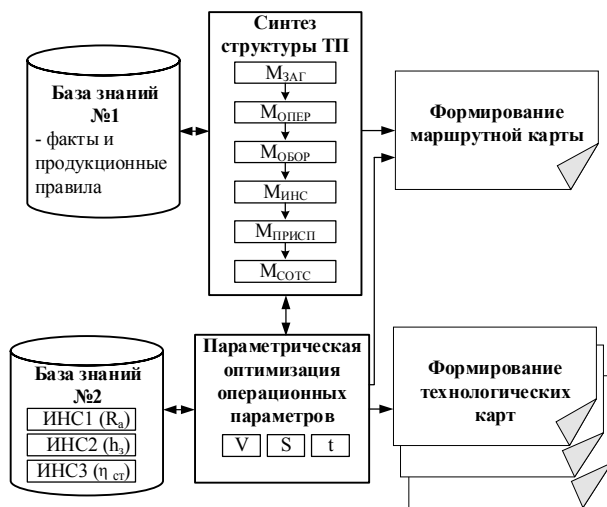


Рис. 1. Архитектура СИППР

При создании данной системы были использованы следующие методы: теория резания металлов при определении структуры технологического процесса изготовления деталей; теория принятия решений – при разработке системы поддержки принятия решений; методы искусственного интеллекта и теории нейронных сетей – при создании базы знаний и обработке экспериментальных данных; производственная логика и логическое программирование – при решении задачи синтеза структуры оптимального технологического процесса; методы решения многокритериальных оптимизационных задач и нелинейное программирование – при решении задачи параметрической оптимизации механообработки; компьютерное моделирование – с целью проверки работоспособности созданной системы.

В СИППР входят две базы знаний (БЗ). В БЗ №1 данные представлены в виде фактов языка Visual Prolog v. 7.5. Данная БЗ обеспечивает работу блока синтеза структуры технологического процесса. Блок синтеза структуры технологического процесса связан с блоком параметрической оптимизации операционных параметров, который, в свою

очередь работает при поддержке базы знаний №2, в которой хранятся весовые коэффициенты искусственной нейронной сети (ИНС), необходимые для расчетов КПД станка $\eta_{СТ}$, уровня износа инструмента по задней поверхности h_3 и фактической шероховатости поверхности R_a , при этом h_3 функционал от V, S, t , а R_a – от V, S, t, h_3 .

Задача решена в многокритериальной постановке путем расчета Парето-оптимального решения, которое позволяет получить решение, в равной степени удовлетворяющее требованиям всех целевых функций.

Для поиска Парето-эффективного решения применялся генетический алгоритм Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm (FFGA), который обладает хорошей сходимостью и его решения не выходят за область допустимых решений. Метод FFGA основан на процедуре ранжирования индивидов, которая происходит на основе Парето-доминирования. Ранг индивида зависит и определяется числом доминирующих его индивидов [11].

Для работы генетического алгоритма были разработаны фитнес-функции и структура хромосомы, включающая два параметра – скорость подачи S и скорость резания V . Вероятность мутации одного бита – 7 %; количество особей – 500; вероятность скрещивания – 93 %; Процесс останавливался при достижении точности вычислений $\varepsilon = 0,001$.

Ниже приведены результаты для операции чернового точения поверхности № 5. Входными параметрами являются: диаметр заготовки – 110 мм; сталь – AISI 52100; глубина резания $t = 4$ мм; модуль продольной упругости заготовки $E_3 = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент, зависящий от способа закрепления заготовки $k_3 = 2$; модуль упругости материала державки $E_H = 2 \cdot 10^5$ МПа; марка станков, инструмента, СОТС и др. исходные данные и параметры – из БЗ СИППР. В качестве технологических и технических ограничений учитывались ограничения (1)...(11). Технологическая карта для обработки поверхности №5, полученная с помощью СИППР, показана в таб. 1.

Для черновой обработки поверхности №5 были определены следующие станок, инструмент и СОТС: станок DMTG-VT30; инструмент Iscar CСMT 09T308; СОТС Cimstar LD 422. Для параметров управления были определены следующие значения: глубина резания $t = 4$ мм, $\Delta = 2$ мм.; скорость резания станка: для острого инструмента $V = 100$ м/мин; для инструмента с износом $h_3 = 0,2$ мм $V = 128$ м/мин; для инструмента с износом $h_3 = 0,4$ мм $V = 147$ м/мин; скорость подачи станка: для острого инструмента $S = 0,57$ мм/об; для инструмента с износом $h_3 = 0,2$ мм $S = 0,52$ мм/об; для инструмента с

износом $h_3 = 0,4$ мм $S = 0,47$ мм/об; стойкость инструмента $T_{ЭФ} = 46$ мин.

На рис. 2 и 3 приведены сравнительные результаты использования рассчитанных параметров, на основании которых можно сделать вывод, что режимы точения, полученные СИППР, являются эффективными и более предпочтительными, чем режимы, применяемые в базовом технологическом процессе или режимы, рекомендованные фирмой производителем инструмента «Iscar» [12].

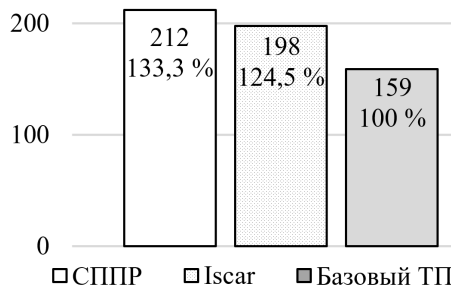


Рис. 2. Количество обработанных деталей за период стойкости инструмента при черновом точении

Для операции чернового точения была выполнена верификация полученных результатов. Определялись оптимальные операционные режимы для многоинструментального станка Spinner PD/C и токарного станка SMTCL CA6150B/1000 с использованием инструмента Alberg CCMW 09T308.

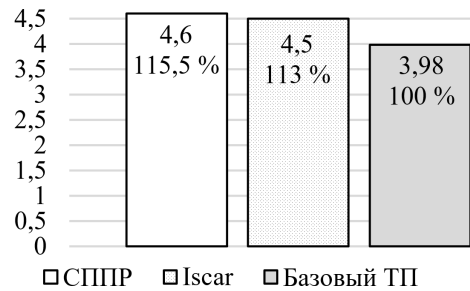


Рис. 3. Производительность операции чернового точения Q при использовании различных операционных режимов

Результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5, где показаны уровни себестоимости и энергозатрат операции чернового точения при различных режимах обработки.

Результаты позволяют сделать вывод, что конкретное решение, полученное с помощью СИППР, является лучшим из возможных, т.к. в случае выбора другого инструмента либо оборудования наблюдается уменьшение $T_{ЭФ}$ и количества деталей, производимых за время $T_{ЭФ}$, а также увеличение энергозатрат на операцию и увеличение себестоимости операции

Таблица 1

Технологическая карта для обработки поверхности №5

Переход	Содержание перехода	Станок	Инструмент (код и наименование) режущий	Режим обработки					h_3
				T	i	S	t	V	
Черновое точение									
065	Токарная с ЧПУ – точить поверхность 5	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	2	0,57	4	100	0	
			Iscar CCMT 09T308	2	0,52	4	128	0,2	
			Iscar CCMT 09T308	2	0,47	4	147	0,4	
Квалитет									
Шероховатость									
СОТС		Cimstar LD 422							
Чистовое точение									
070	Токарная с ЧПУ – точить поверхность 5	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	2,8	0,54	2,8	112	0	
			Iscar CCMT 09T308	2,8	0,504	2,8	128	0,2	
			Iscar CCMT 09T308	2,8	0,46	2,8	147	0,4	
Квалитет		13							
Шероховатость		5							
СОТС		Cimstar LD 422							
Суперфинишное точение									
075	Токарная с ЧПУ – точить поверхность 5	DMTG-VT30	Sandvik CB7015 S01020	0,2	0,17	0,2	200	0	
			Sandvik CB7015 S01020	0,2	0,155	0,2	275	0,2	
			Sandvik CB7015 S01020	0,2	0,141	0,2	315	0,4	
Квалитет		7							
Шероховатость		0,64							
СОТС		нет							

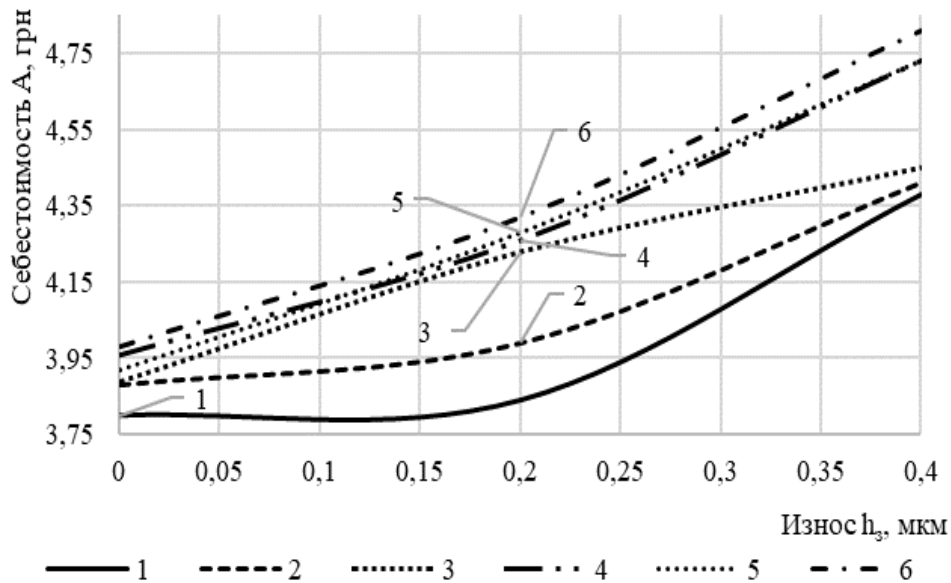


Рис. 4. Себестоимость операции чернового точения при разных операционных параметрах, где 1 – станок и инструмент, рекомендованные СИПР; 2 – станок, рекомендованный СИПР, инструмент Alberg CCMW 09T308; 3 – станок Spinner PD/C, инструмент Iscar CCMT 09T308; 4 – станок Spinner PD/C, инструмент Alberg CCMW 09T308; 5 – станок SMTCL CA6150B/1000, инструмент Iscar CCMT 09T308; 6 – станок SMTCL CA6150B/1000T, инструмент Alberg CCMW 09T308

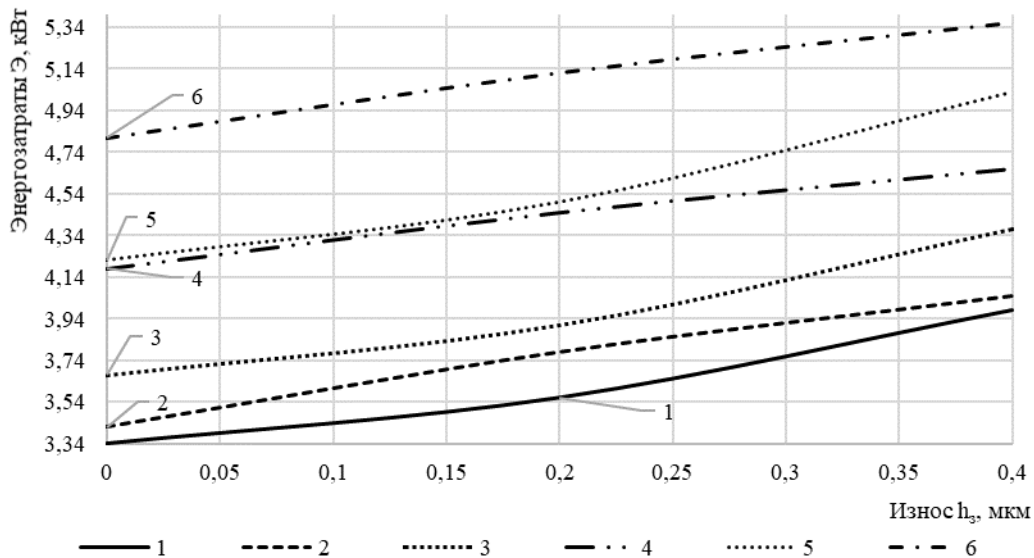


Рис. 5. Энергозатраты на операцию чернового точения при разных операционных параметрах, где 1 – станок и инструмент, рекомендованные СИПР; 2 – станок, рекомендованный СИПР, инструмент Alberg CCMW 09T308; 3 – станок Spinner PD/C, инструмент Iscar CCMT 09T308; 4 – станок Spinner PD/C, инструмент Alberg CCMW 09T308; 5 – станок SMTCL CA6150B/1000, инструмент Iscar CCMT 09T308; 6 – станок SMTCL CA6150B/1000T, инструмент Alberg CCMW 09T308

На рис. 6 и 7 показаны затраты времени и суммарная себестоимость производства детали «Корпус фильтра» при различных операционных параметрах. Время, затрачиваемое на производство одной детали «Корпус фильтра» при использовании ТП, получен-

ного с помощью СИПР, на 5,2 % меньше, чем при использовании базового ТП. Суммарная себестоимость производства детали «Корпус фильтра» тоже уменьшилась с 613,33 грн. до 527,47 грн., что дает экономию 14 %.

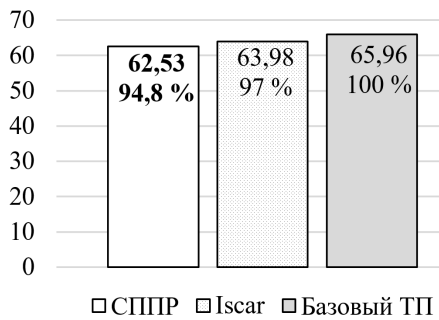


Рис. 6. Время, затрачиваемое на производство одной детали «Корпус фильтра» при различных операционных параметрах, мин

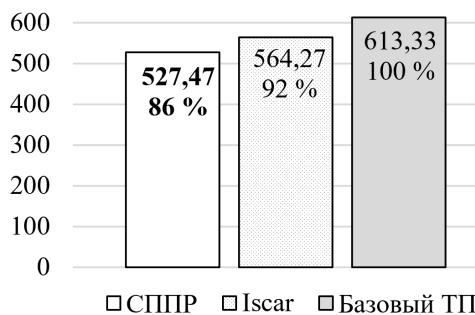


Рис. 7. Суммарная себестоимость производства детали «Корпус фильтра» при различных операционных параметрах, грн

На основании приведенных данных можно сделать выводы об эффективности решений, полученных с помощью СИПР по сравнению с решениями, предложенными в базовом технологическом процессе или решениями, предложенными фирмой-производителем инструмента «Iscar» [12].

В результате расчетов были получены оптимальные параметры режимов для операции точения, применение которых позволяет сократить время изготовления детали на 5,2 %, себестоимость операций на 14 %, при этом средний срок эксплуатации инструмента повышается на 11,83 % по сравнению с режимами базового технологического процесса.

Заклучение

В работе показана постановка и решение задачи определения оптимальных параметров операций точения, где учитывались: накапливаемый износ инструмента по задней поверхности, период стойкости инструмента и изменения коэффициента полезного действия станка. Постановка задачи осуществлялась в виде МОЗ с тремя целевыми функциями: себестоимость операции, энергозатраты и производительность операций. Результаты получены путем расчета Парето-оптимального решения с помощью

генетических алгоритмов. Такой подход позволяет решать комплексно реальные задачи производства.

Литература

1. Богуслаев, А. В. *Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей [Текст] : монография / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник ; под общ. ред. А. В. Богуслаева. – Запорожье : ОАО Мотор Сич, 2009. – 468 с.*
2. Кондаков, А. И. *САПР технологических процессов [Текст] / А. И. Кондаков. – СПб. : Academia, 2010. – 272 с.*
3. Prakash, M. D. *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods [Text] / M. D. Prakash, S. D. Uday, D. Shanker. – London : Springer-Verlag London Limited, 2008. – 590 p.*
4. Davim, J. P. *Computational Methods for Optimizing Manufacturing Technology: Models and Techniques [Text] / J. P. Davim. – USA : IGI Global, 2012. – 395 p.*
5. Choudhuri, K. *Multi-objective optimization in turning – using a Genetic Algorithm [Text] / K. Choudhuri, D. K. Pratihar, D. K. Pal // Journal of Institute of Engineers. – 2002. – Vol. 82. – pp. 37-44.*
6. *Multi-objective optimization of cutting parameters for turning AISI 52100 steel [Text] : 7ème Assises MUGV2012, ENISE – CETIM / Serra R., Chibane H. – Saint-Etienne, 16-18 octobre 2012. – pp. 52-67.*
7. Яцерицын, П. И. *Теория резания [Текст] / П. И. Яцерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.*
8. Хавина, И. П. *Применение нейронных сетей в технологических процессах механообработки [Текст] / И. П. Хавина, В. В. Лимаренко // Автоматизированные технологии и производства : сб. науч. тр. – Магнитогорск, 2013. – Вып. 5. – С. 252–258.*
9. Хавина, И. П. *Система поддержки принятия решений оптимизации технологических процессов механообработки [Текст] / И. П. Хавина, В. В. Лимаренко // Системы обработки информации : сб. науч. пр. Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, – 2015 р. – Вип. 11 (131) – С. 76–84.*
10. Song, W. *Development of predictive force models for classical orthogonal and oblique cutting and turning operations incorporating tool flank wear effects [Text] : PhD / Wenge Song. – Queensland University of Technology, 2006. – 208 p.*
11. Fonseca, C. M. *Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms [Text] / C. M. Fonseca, P. J. Fleming // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans. – 1998. – Vol. 28. – pp. 26–37.*

12. Iscar [Электронный ресурс] / Iscar – Machining Power. – Режим доступа: <http://mpwr.iscar.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=57ced7e2c19045afb4edf6639f8a2fe5>. – 04.02.2016 з.

References

1. Boguslaev, A. V., Oleinik, Al. A., Oleinik, An. A. *Progressivnye tekhnologii modelirovaniya, optimizatsii i intellektual'noi avtomatizatsii etapov zhiznennogo tsikla aviatsionnykh dvigatelei* [Progressive technologies of modeling, optimization and intelligent automation of the life cycle stages of aircraft engines]. Zaporozh'e, OAO Motor Sich Publ., 2009. 468 p.
2. Kondakov, A. I. *SAPR tekhnologicheskikh protsessov* [CAD of technological processes]. St. Petersburg, Academia Publ., 2010. 272 p.
3. Prakash, M. D., Uday, S. D., Shanker, D. *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*. London, Springer-Verlag London Limited Publ., 2008. 590 p.
4. Davim, J. P. *Computational Methods for Optimizing Manufacturing Technology: Models and Techniques*. USA, IGI Global Publ., 2012. 395 p.
5. Choudhuri, K., Pratihar, D. K., Pal, D. K. Multi-objective optimization in turning – using a Genetic Algorithm. *Journal of Institute of Engineers*, 2002, vol. 82, pp. 37-44.
6. Serra, R., Chibane, H. Multi-objective optimization of cutting parameters for turning AISI

52100 steel. *7ème Assises MUGV2012, ENISE – CETIM*. Saint-Etienne, 2012, pp. 52-67.

7. Yashcheritsyn, P. I., Fel'dshtein, E. E., Kornievich, M. A. *Teoriya rezaniya* [Theory of cutting]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2006. 512 p.
8. Khavina, I. P., Limarenko, V. V. Primenenie neironnykh setei v tekhnologicheskikh protsessakh mekhanooobrabotki [Application of neural networks in technological processes of machining]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva. Sbornik nauchnykh trudov*. 2013, vol. 5, pp. 252-258.
9. Khavina I. P., Limarenko, V. V. Sistema podderzhki prinyatiya reshenii optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov mekhanooobrabotki [Decision support system for optimization of machining processes]. *Sistemi obrobki informatsii. Zbirnik naukovikh prats'. Kharkivs'kii universitet Povitryanikh Sil im. I. Kozheduba*. [Proc. Kharkiv KhUPS «Information processing systems»], 2015, vol. 11 (131), pp. 76-84.
10. Song, W. *Development of predictive force models for classical orthogonal and oblique cutting and turning operations incorporating tool flank wear effects*. PhD. Queensland University of Technology, 2006. 208 p.
11. Fonseca, C. M., Fleming, P. J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*. 1998, vol. 28, pp. 26-37.
12. Iscar. *Iscar – Machining Power*. Available at: <http://mpwr.iscar.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=57ced7e2c19045afb4edf6639f8a2fe5> (accessed 04.02.2016).

Поступила в редакцію 5.09.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017

РІШЕННЯ ЗАВДАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ПРИ ОПЕРАЦІЇ ТОЧІННЯ

В. В. Лимаренко, І. П. Хавіна

Показано постановку і рішення із застосуванням системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СІПІР) задачі оптимізації параметрів обробки металів при операції точіння. Завдання ставилося в ході розробки СІПІР, що дозволяє автоматизувати розробку технологічного процесу (ТП), оптимізувати і керувати ним. Відсутність таких систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень не дозволяє підприємствам повною мірою скористатися наявними можливостями високотехнологічного обладнання і знижує ефективність і прибутковість виробництва по причині нерационального використання верстатного парку, матеріальних і інженерних ресурсів підприємств. Завдання синтезу оптимального технологічного процесу вирішуються в два етапи: перший – структурна оптимізація технологічного процесу (синтез оптимальної структури ТП); другий – параметрична оптимізація технологічного процесу (визначення оптимальних режимів операційних параметрів для всіх операцій технологічного процесу). Завдання оптимізації параметрів обробки металів при операції точіння є однією з підзадач другого етапу синтезу оптимальної структури технологічного процесу механічної обробки металів. Завдання вирішене з урахуванням рівня зносу, що накопичується по задній поверхні інструменту, рівня ККД верстата, що залежить від режимів роботи і періоду економічно-ефективної стійкості інструменту. Завдання вирішене в багатокритерійній постановці з урахуванням трьох цільових функцій: собівартість операцій, питомі енерговитрати на операції і продуктивність операції і десяти існуючих технічних і технологічних обмежень. Рішення отримано у вигляді Парето-оптимального. В ході рішення застосовувалися штучна нейронна мережа і генетичний алгоритм FFGA. Такий підхід дозволяє вирішувати завдання оптимізації реального виробництва. Показано: постановку задачі та її практичне рішення, структуру розробленої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень, наведено практичні результа-

ти вирішення поставленого завдання, показано верифікацію отриманих результатів. Показано отриману за допомогою СИППР технологічну карту для обробки поверхні деталі «Корпус фільтра» приводу генератора ГП-21.

Ключові слова: СИППР, оптимізація параметрів операції точіння, знос інструменту, що накопичується, економічно-ефективна стійкість інструменту, багатокритеріальна оптимізаційна задача, Парето-оптимальне рішення.

SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMIZING THE PARAMETERS OF METAL PROCESSING DURING THE TURNING OPERATION

V. V. Limarenko, I. P. Khavina

The statement and solution with the application of the intellectual decision support system (IDSS) for optimization of metal processing parameters during the turning operation are shown. The task was posed during the development of IDSS, which allows automating the development of the technological process (TP), optimizing and managing it. The absence of such systems of intellectual support for decision-making does not allow enterprises to fully utilize the capabilities of high-tech equipment and reduces the efficiency and profitability of production due to inefficient use of machine tools, material and engineering resources of enterprises. The tasks of synthesis of the optimal technological process are solved in two stages: the first – structural optimization of the technological process (synthesis of the optimal TP structure); the second – parametric optimization of the technological process (determination of optimal operating parameters for all operations of the technological process). The task of optimizing the parameters of metal processing during the turning operation is one of the subtasks of the second stage of the synthesis of the optimal structure of the technological process of metal machining. The task is solved taking into account the level of accumulated wear on the back surface of the tool, the level of machine efficiency, depending on the operating modes and the period of economically effective tool life. The task is solved in a multi-criteria setting taking into account three objective functions: the cost of operations, the specific energy costs for operations and the operation's performance and the ten existing technical and technological limitations. The solution is obtained as a Pareto-optimal solution. During the solution, an artificial neural network and the genetic algorithm FFGA were applied. This approach allows us to solve the problems of optimization of real production. Shown: the statement of the problem and its practical solution, the structure of the developed system of intellectual support for decision-making, present's practical results of solving the task, verified the results obtained. The technological map obtained with the help of the IDSS for processing the surface of the «Filter housing» component of the GP-21 generator drive.

Keywords: IDSS, Optimization of turning the operation parameters, the accumulated wear of the tool, cost-effective tool life, multi-objective optimization problem, the Pareto-optimal solution.

Лимаренко Вячеслав Владимирович – ст. преп. каф. вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: slaw_lww@ukr.net.

Хавина Инна Петровна – канд. техн. наук, доц., проф. каф. вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: inna.khavina25@gmail.com.

Limarenko Vyacheslav Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Computer Science and Programming, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: slaw_lww@ukr.net.

Khavina Inna Petrovna – Ph.D., Associate Professor, Chair of Computer Science and Programming, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: inna.khavina25@gmail.com.