

УДК 681.513

В.В. Лимаренко, И.П. Хавина, А.Н. Рысованый

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

## ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИЙ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

На примере нахождения оптимальных параметров операций торцевого фрезерования показана постановка и решения задачи с учетом: накапливаемого износа инструмента по задней стенке; вычисляемого периода стойкости инструмента и изменения коэффициента полезного действия станка. Постановка задачи осуществлялась в виде МОЗ с тремя целевыми функциями: себестоимость операции, энергетические затраты на операцию и производительность операций. Результаты получены путем расчета Парето-эффективного решения с помощью генетического алгоритма FFGA. Такой подход позволяет решать комплексно задачи реального производства.

**Ключевые слова:** оптимальные параметры операции, накапливаемый износ инструмента, стойкость инструмента, многокритериальная оптимизационная задача, Парето решение.

### Актуальность темы

На современном этапе развития промышленного производства около 70-80% изделий изготавливаются с помощью обработки резанием, т.к. технологические процессы (ТП) механической обработки (резка, точение, фрезерование, сверление и т.п.) обеспечивают высокое качество обрабатываемой поверхности при сравнительно небольших затратах на обработку. В последние годы проводится большое количество исследований, направленных на улучшение эффективности ТП механической обработки. Одним из направлений совершенствования ТП являются применение систем поддержки принятия решений (СППР), которые имеют в своем составе базу знаний (БЗ) и на основе методов искусственного интеллекта выполняют расчет оптимальных параметров операций механообработки металлов [1, 2].

Задача параметрической оптимизации процессов механообработки металлов является сложной многокритериальной и многопараметрической оптимизационной задачей т.к. процесс резания характеризуется большим количеством параметров и факторов, которые имеют сложную связь и взаимное влияние. На рис. 1 показана сокращенная схема связей параметров и факторов, входящих в процесс механообработки резанием и их взаимного влияния. 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. На рис. 1 в прямоугольных блоках изображены те факторы и параметры, которые можно отнести к входным.

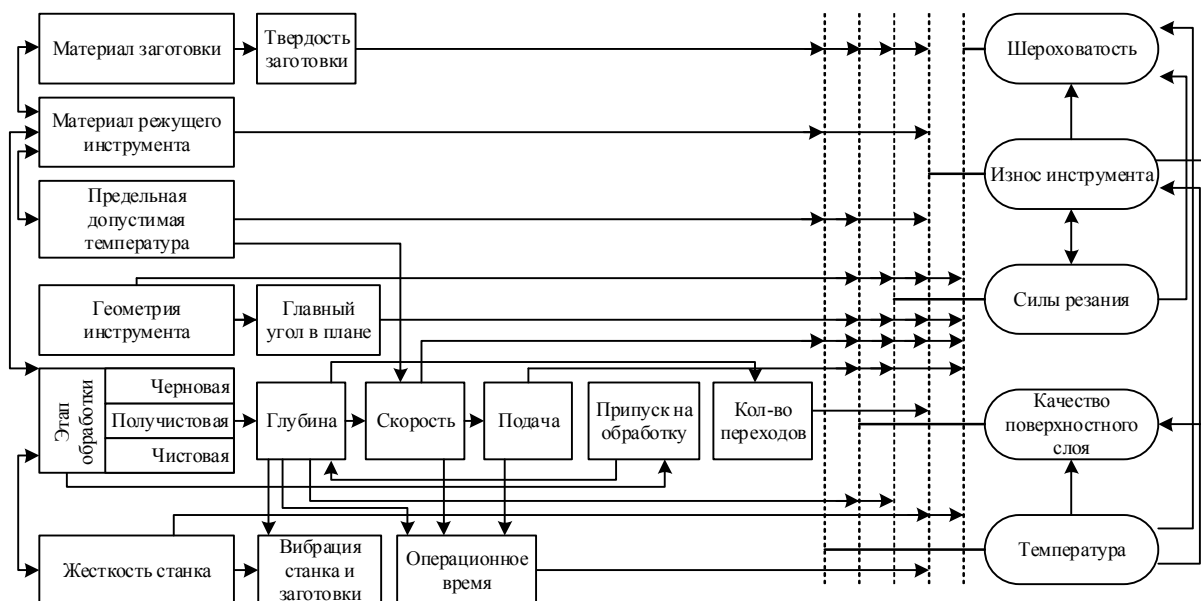


Рис. 1. Схема связей входных и выходных параметров ТП механообработки и их взаимного влияния

Часть этих факторов и параметров являются исходными не могут произвольно изменяться в случае использования конкретного оборудования либо инструмента, остальные формируются, как результат взаимного влияния группы входных и выходных параметров процесса [1-4]. Выходные параметры процесса механообработки (овальные блоки) являются, как результат процесса механообработки. Часть выходных параметров (шероховатость, качество поверхностного слоя) являются технологическими ограничениями, их величина задается в требованиях к конкретной детали, другая группа выходных параметров формируется в процессе механообработки и оказывает соответствующие влияние на качество конечного продукта. Выходные параметры так же имеют сложную структуру взаимосвязей и взаимного влияния друг на друга.

### Постановка задачи

В работе рассмотрена постановка и решение задачи оптимизации параметров резания для операции концевой фрезеровки поверхности № 27 детали «Корпус фильтра», являющейся составной частью привода-генератора модели ГП-21 электроэнергии бортовой сети самолета (рис. 2).

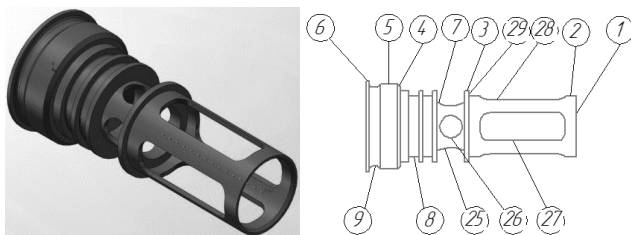


Рис. 2. Общий вид детали «Корпус фильтра» и нумерация его поверхностей

Особенностью задачи является то, что при решении задачи оптимизации, учитывается:  $h_3$  – накапливаемый износ по задней поверхности инструмента;  $T_{эф}$  – период стойкости инструмента, который определяется как сумма времен эффективного использования инструмента при изготовлении оптимальной партии деталей и изменения  $\eta_{ст}$  – коэффициента полезного действия станка. Это позволяет математическую модель операций резания максимально приблизить к реальной физической модели процесса. В работе не учитывается влияние температуры, т.к. рассматриваются операции с очень малой толщиной среза. При оптимизации параметров операций фрезеровки принято восемь технологических ограничений, которые сформированы на основании работ [3-4].

**Ограничение 1.** За мощность электродвигателя привода главного движения станка [3, 4]  $N_{дв} = F_c V / (60 \cdot 10^3 \eta_{ст}) \leq N_{дв.пасп}$ , где  $N_{дв}$  – потребляемая мощность электродвигателя станка, кВт;

$F_c$  – тангенциальная составляющие силы резания, Н;  $V$  – скорость операции резания, м/мин;  $\eta_{ст} = \eta_{дв} \eta_{к}$  – коэффициент полезного действия станка, где  $\eta_{дв}$  – КПД двигателя,  $\eta_{к}$  – КПД кинематической цепи станка, %;  $N_{дв.пасп}$  – предельная паспортная потребляемая мощность электродвигателя станка, кВт.

**Ограничения 2 – 5.** По диапазону скорости и подачи операции резания  $V_{min} \leq V \leq V_{max}$ , и  $S_{min} \leq S \leq S_{max}$ , где  $V_{min}, V_{max}$  – минимальная и максимальная скорость оборотов инструмента на станке, м/мин;  $S_{min}, S_{max}$  – минимальная и максимальная допустимая скорость подачи станка, мм/мин [3, 4].

**Ограничение 6.** По прочности зуба инструмента  $\sigma_{max} = F_c l_{в.з} / W \leq [\sigma_{и}], [\sigma_{и}] = \sigma_{о.н.} / k_{з.п}$ , где  $l_{в.з}$  – вылет зуба фрезы, мм;  $W$  – момент сопротивления поперечника державки резца, мм<sup>3</sup>;  $[\sigma_{и}]$  – допустимое напряжение материала державки резца, МПа;  $k_{з.п}$  – коэффициент запаса прочности;  $\sigma_{о.н.}$  – опасное напряжение для материала державки, Мпа [3, 4].

**Ограничение 7.** По жесткости инструмента  $f_{и} = F_{у.макс} l_{в.ф}^3 / (3E_{и} I_{и}) \leq f_{ди}$ , где  $f_{и}$  – стрела прогиба державки фрезы, мм;  $l_{в.ф}$  – длина вылета резца фрезы, мм;  $E_{и}$  – модуль упругости материала державки фрезы, Н/мм<sup>2</sup>;  $I_{и} = W_{д} H_{д}^3 / 12$  – момент инерции поперечника державки фрезы, мм<sup>4</sup>;  $W_{д}$  – ширина прямоугольного поперечника державки фрезы, мм;  $H_{д}$  – высота прямоугольного поперечника державки фрезы, мм;  $f_{ди}$  – допустимая стрела прогиба державки фрезы, мм [3, 4].

**Ограничение 8.** По требованию к шероховатости поверхности [1-6]  $R_a = f_1(V, S, t, h_3) \leq R_{a\max}$ , где  $R_a$  – фактическая шероховатость поверхности и  $h_3$  – фактический износ инструмента, при реализуемых режимах операции, мкм;  $R_{a\max}$  – максимально допустимая шероховатость поверхности, мкм [3-4].

В работе для параметрической оптимизации операции конечного фрезеровки 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

$$A = \frac{l_3}{S} \left( a_{раб} + a_{эксп} + \frac{e}{T_{эф}} + \frac{q_3 F_c V}{6 \cdot 10^4 \eta_{ст}} \right) \Rightarrow \min,$$

где  $T_{эф} = \sum_1^n \tau_o(V, S, t, h_3)$ , а  $n$  – количество циклов, отработанных инструментом до момента его замены.

Т.е. эксплуатация инструмента происходит до момента, пока себестоимость операции не превысит допустимого уровня.

Целевая функция 2. Удельные энергозатраты

$$\text{(потребляемая мощность)} \quad \Theta = \frac{F_C V}{6 \cdot 10^4 \eta_{ст}} \Rightarrow \min.$$

Целевая функция 3. Производительность операции [3, 4]  $Q = St/(1_3 \Delta) \Rightarrow \max.$

В работе получила дальнейшее развитие модель [58], на основании которой получены соотношения для расчета сил при операциях фрезерования:

$$F_x = \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{array}{l} C_1(\cos 2\theta_m - \cos 2\theta_n) + \\ + C_2 \left[ (\sin 2\theta_m - \sin 2\theta_n) - 0.5(\theta_m - \theta_n) \right] - \\ - C_3(\sin \theta_m - \sin \theta_n) + C_4(\cos \theta_m - \cos \theta_n) \end{array} \right\},$$

$$F_y = \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{array}{l} -C_1 \left[ (\sin 2\theta_m - \sin 2\theta_n) - 0.5(\theta_m - \theta_n) \right] + \\ + C_2(\cos 2\theta_m - \cos 2\theta_n) - \\ - C_3(\cos \theta_m - \cos \theta_n) - C_4(\sin \theta_m - \sin \theta_n) \end{array} \right\},$$

$$F_c = 4C_1(\cos \theta_m - \cos \theta_n) + C_4(\cos \theta_m - \cos \theta_n),$$

$$F_t = 4C_2(\cos \theta_m - \cos \theta_n) + C_3(\cos \theta_m - \cos \theta_n),$$

$$C_1 = C_{cs} r_{\Phi} f_t / (4tg\beta), \quad C_2 = C_{ts} r_{\Phi} f_t / (4tg\beta),$$

$$C_3 = \frac{r_{\Phi}}{tg\beta} (C_{te} + C_{tw} h_3), \quad C_4 = \frac{r_{\Phi}}{tg\beta} (C_{ce} + C_{cw} h_3),$$

где  $F_x$  – сила, действующая в направлении продольной подачи, Н;  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , – вычисляемые константы;  $\theta_n, \theta_m$  – углы, определяющие положение начальной и конечной точки режущей кромки зуба фрезы, находящегося в текущий момент времени в контакте с обрабатываемым материалом;  $F_y$  – сила, действующая в направлении поперечной подачи, Н;  $F_t$  – нормальная компонента силы резания, Н;  $C_{cs}, C_{ts}$  – экспериментальные константы резания, представляющие собой удельные характеристики процесса резания, связанные с процессом стружкообразования (Н/мм<sup>2</sup>);  $C_{ce}, C_{te}$  – экспериментальные константы резания, представляющие собой удельные характеристики процесса резания, связанные с влиянием величины радиуса закругления режущей кромки на силы резания (Н/мм);  $C_{cw}, C_{tw}$  – экспериментальные компоненты удельного давления на площадке износа по задней поверхности инструмента (Н/мм<sup>2</sup>);  $r_{\Phi}$  – радиус фрезы (мм);  $f_t$  – подача на зуб (мм/зуб);  $\beta$  – угол наклона режущей кромки (рад);  $h_3$  – износ инструмента по задней поверхности (мм).

Наибольшее влияние на изменение параметров операций с течением времени имеет величина износа инструмента  $h_3$ , т.к. то него зависит уровень сил в зоне резания, шероховатость поверхности, температурные явления, размерная точность получаемой детали и т.п. [1, 4-7].

## Основная часть

В работе определение оптимальных параметров для операции концевой фрезерования решено с учетом накапливаемого износа по задней поверхности инструмента, т.к. на основании работ [6, 7] выявлено, что основной износ возникает между задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью детали. Также в работе предложен учет изменяющегося КПД электродвигателя в зависимости от мощности, потребляемой станком. Для реализации решения была создана система поддержки принятия решений и база знаний, обеспечивающая систему необходимыми данными и знаниями.

Одной из проблем, возникающих при данной постановке задачи, является то, что не для всех параметров, входящих в математическую модель, известный аналитический вид функции, позволяет рассчитать параметр с заданной точностью. К таким параметрам относятся: стойкость инструмента  $T_{\Phi}$ , уровень износа инструмента по задней поверхности  $h_3$  и фактическая шероховатость поверхности  $R_a$ . При этом  $h_3$  функционал от  $V, S, t, a, T_{\Phi}$  и  $R_a$  – от  $V, S, t, h_3$ . Для нахождения значений данных параметров использована обученная на базе ограниченного числа экспериментальных данных искусственная нейронная сеть перцептрон с двумя скрытыми слоями. Экспериментальные данные приведены в [5, 8-10].

Задача решена в многокритериальной постановке путем расчета Парето-эффективного решения, которое формирует решение, которое в равной мере соответствует 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 [11-12].

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  $\varepsilon = 0,001$ .

Входными параметрами процесса фрезерования для поверхности № 27 являются:

- толщина заготовки – 10 мм;
- сталь – AISI 52100;
- глубина фрезерования  $t = 10$  мм;
- модуль продольной упругости  $E_3 = 2 \cdot 10^5$  МПа;
- коэффициент зависящий от способа закрепления заготовки  $k_3 = 2$ ;
- модуль упругости материала  $E_{II} = 2 \cdot 10^5$  МПа;

тип станка, инструмента, СОТС и др. входные данные и параметры из БЗ СППР.

Для фрезерования поверхности № 27 применялся станок DMTG-X6140, и инструмент Sandvik CoroMill Plura R215.28 и СОТС Cimstar LD 422. Для параметров операций концевой фрезерования были получены 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. 3, 4 приведены сравнительные результаты использования рассчитанных параметров, на основании которых можно сделать вывод, что режимы фрезерования, полученные СППР, более эффективные, чем режимы, применяемые в базовом технологический процессом или режимами рекомендованными фирмой производителем инструмента Sandvik [11, 12].

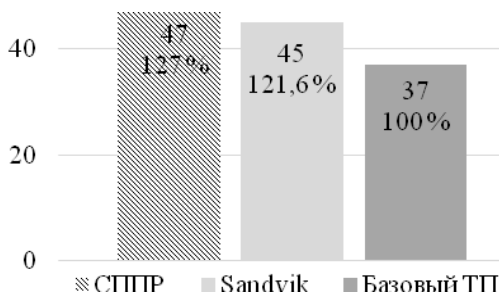


Рис. 3. Количество обработанных деталей за период стойкости инструмента при фрезеровании, шт

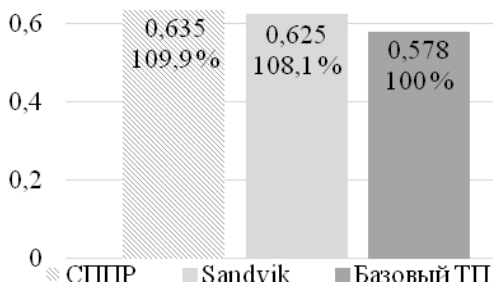


Рис. 4. Производительность операции фрезерования Q при использовании различных операционных режимов, шт/мин

Для операции фрезерования была выполнена верификация полученных результатов. Определя-

лись оптимальные операционные режимы для многоинструментального станка Spinner PD/C и фрезерного станка FGU RT с использованием инструмента Iscar M.M. EC.500B37R060. Проанализировав полученные данные можно сделать вывод о правильности решения, полученного с помощью СППР, потому что в случае выбора другого инструмента или оборудования наблюдается уменьшение  $T_{ЭФ}$  и количества деталей, произведенных за время  $T_{ЭФ}$ , а также увеличение энергозатрат на операцию и себестоимости операции.

На рис. 5, 6 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, полученного с помощью СППР, на 5,2 % меньше, чем при использовании базового ТП. Суммарная себестоимость производства детали «Корпус фильтра» тоже уменьшилась с 613,33 грн. в 527,47 грн., что дает экономию 14 %.

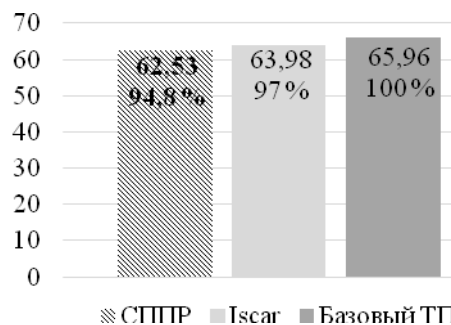


Рис. 5. Время, затрачиваемое на производство одной детали «Корпус фильтра» при различных операционных параметрах, мин

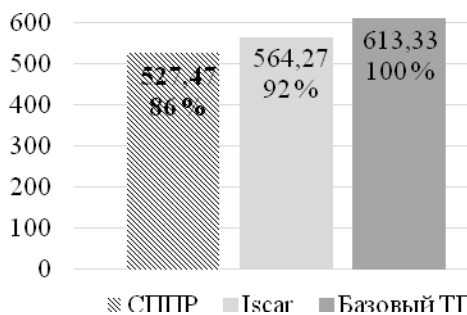


Рис. 6. Суммарная себестоимость производства детали «Корпус фильтра» при различных операционных параметрах, грн

На основании данных, приведенных на рис. 5, 6, можно сделать выводы об эффективности решений, полученных с помощью СППР по сравнению с решениями, предложенными в базовом технологическом процессе или решениями, предложенными фирмами-производителями инструмента Iscar [13, 14] и Sandvik [11, 12].

В результате расчетов были получены оптимальные параметры режимов для операции фрезеро-

вания, 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.

### Выводы по работе

В работе показана постановка и решение задачи определения оптимальных параметров операций торцевого фрезерования, 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.

### Список литературы

1. Воронцов А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении / А. Л. Воронцов, А. Ю. Албагачиев, Н. М. Султан-заде ; Старый Оскол : ТНТ, 2014. – 552 с.
2. Богуслаев А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / [А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, и др.] ; под ред. А. В. Богуслаев. – Запорожье : ОАО Мотор Сич, 2009. – 468 с.
3. Яцерицын П. И. Теория резания / П. И. Яцерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич ; Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.
4. Воронцов А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении / А. Л. Воронцов, А. Ю. Албагачиев, Н. М. Султан-заде ; Старый Оскол : ТНТ, 2014. – 552 с.
5. Wenge Song. Development of predictive force models for classical orthogonal and oblique cutting and turning operations incorporating tool flank wear effects: PhD / Wenge Song. – Queensland University of Technology, 2006. – 208 p.
6. Белозеров В. А. Механика деформирования и разрушения при резании. Том 2. Обработка инструментами из СТМ / В. А. Белозеров, М. Х. Утешев, А. Н. Калиев ; Тюмень : ТюмНГТУ. – 2012. – 128 с.
7. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
8. Yong Huang. Modeling of Cutting Forces Under Hard Turning Conditions Considering Tool Wear Effect / Yong Huang, Steven Y. Liang // Transactions of the ASME, MAY 2005, Vol. 127, 262-270 pp.
9. Milan Milutinović. Cutting Forces in Hard Turning Comprising Tool Flank Wear and its implication for the Friction Between Tool and Workpiece / Milan Milutinović, Ljubodrag Tanović // Tehnički vjesnik. – 2016. – №23. – pp. 1373-1379
10. Tugrul Ozel. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning / Tugrul Ozel, Tsu-Kong Hsu, Erol Zeren // International journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – №25. – 262-269 pp.
11. Sandvik Coromant [Электронный ресурс] // Sandvik Coromant – электронный каталог. – 2016. – Режим доступа до статті : <http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/tools.aspx>.
12. Sandvik Coromant [Электронный ресурс] // Sandvik Coromant – Toolguide. – 2016. – Режим доступа: <http://toolguide.sandvik.coromant.com/TouchTime/>
13. Iscar [Электронный ресурс] // Iscar – электронный каталог. – 2016. – Режим доступа: <http://www.iscar.com/eCatalog/Index.aspx>
14. Iscar [Электронный ресурс] // Iscar – Machining Power. – 2016. – Режим доступа: <http://mpwr.iscar.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=57ced7e2c19045afb4edf6639f8a2fe5>.

Надійшла до редколегії 15.03.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Семенов, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

### ПОСТАНОВКА ТА ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙ РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

В.В. Лимаренко, І.П. Хавіна, О.М. Рисований

На прикладі знаходження оптимальних параметрів операцій кінцевого фрезерування показана постановка і вирішення завдання з урахуванням: накопичується зносу по задній стінці інструмента; обчислюється періоду стійкості інструменту і зміни коефіцієнта корисної дії верстата. Постановка завдання здійснювалася у вигляді МОЗ з трьома цільовими функціями: собівартість операції, енергозатрат і продуктивність операцій. Результати отримані шляхом розрахунку Парето-ефективного вирішення за допомогою генетичного алгоритму FFGA. Такий підхід дозволяє вирішувати комплексно завдання реального виробництва.

**Ключові слова:** оптимальні параметри операції, накопичується знос інструменту, стійкість інструменту, багатокритеріальна оптимізаційна задача, Парето рішення.

### STATEMENT AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF METAL CUTTING OPERATIONS

V.V. Limarenko, I.P. Havina, O.M. Rysovanyi

On the example of finding the optimal parameters of the end milling operations, the formulation and solution of the problem is shown taking into account: the accumulated wear along the back wall of the tool; The calculated period of tool life and the change in the coefficient of efficiency of the machine. Statement of the problem was carried out in the form of the MOH with three objective functions: the cost of the operation, energy costs and the productivity of operations. The results are obtained by calculating the Pareto-efficient solution using the genetic algorithm FFGA. This approach allows us to solve complex problems of real production.

**Keywords:** optimal operation parameters, accumulated tool wear, tool resistance, multicriteria optimization problem, Pareto solution.