

УДК 681.513

В.В. Лимаренко, И.П. Хавина

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕХА

В работе для планирования загрузки оборудования механообрабатывающего цеха предложена система поддержки принятия решений основанная на мультиагентной системе, которая учитывает особенности технологического процесса лезвийной обработки, включая накопленный износ инструмента и в условиях имитационной модели производства обеспечивает минимальное время изготовления партий изделий.

Ключевые слова: планирование загрузки оборудования, мультиагентная система, оптимизация параметров технологических процессов обработки резанием с учетом износа инструмента, многокритериальная оптимизация, Парето-оптимальное решение.

Введение

Современное машиностроительное предприятие, базирующееся на механической обработке материалов, представляет собой сложную многокомпонентную систему, содержащую большое количество связей, значительный объем материальных ресурсов и потоков информации. При этом, как правило, такое предприятие является корпорацией – крупным объединением предприятий, включающим как производственные, так и не производственные подразделения, что требует наличия корпоративной системы управления производством для оперативного решения задач управления [1 – 4]. Создание системы управления таким предприятием задача сложная и в каждом конкретном случае имеет свои особенности.

Постановка проблемы и анализ литературы. Развитие современных информационных технологий дает широкие возможности для совершенствования процессов управления, а наиболее эффективными оказываются системы поддержки принятия решений (СППР), построенные на основе подходов искусственного интеллекта (ИИ) – мультиагентных систем (МАС), которые доказали свою работоспособность в условиях реального времени [5 – 10] и состоят из группы различных типов агентов, которые могут взять на себя конкретные роли в организационной структуре [6]. Особенностью применения МАС является отсутствие системы глобального управления, децентрализация данных, вычисления производятся в асинхронном режиме. Индивидуальная оптимизация действий каждого агента приводит к глобальному оптимуму системы. Этот эффект возникает в результате взаимодействия агентов, которое основано на принципах аукциона, с помощью которого и определяется оптимальное решение в конкретной ситуации [6, 7]. Таким образом агентная технология является масштабируемой для широкого круга задач планирования и моделирования как для

небольших, так и крупных предприятий с сотнями подключенных устройств. В работе для планирования загрузки оборудования механообрабатывающего цеха предложена структура МАС, которая учитывают особенности технологического процесса резания, включая накопленный износ инструмента и в условиях имитационной модели производства с помощью комбинаторных аукционов обеспечивает минимальное время изготовления партий изделий.

Результаты исследований

Мультиагентная система цеха механообработки имеет следующую структуру:

$$MAS = \langle \{A^1, \dots, A^i\}, \{K_1, \dots, K_k\}, \{KB_1, \dots, KB_m\} \rangle,$$

где $\{A^1, \dots, A^i\}$ – множество агентов; $\{K_1, \dots, K_k\}$ – множество образуемых в данный момент коалиций; $\{KB_1, \dots, KB_m\}$ – базы знаний МАС.

Коалицией считается временное объединение некоторого числа агентов для достижения общей цели, при этом их ресурсы становятся общими. Коалиция обеспечивает агентов возможностью договориться и составить совместный план действий по использованию общих ресурсов и средств для согласованного выполнения всех заказов [6, 7]. Коалиция агентов имеет структуру

$$K = \langle \text{Name}, \{A^1, \dots, A^n\}, G, \{St_1, \dots, St_l\}, KB \rangle,$$

где Name – имя коалиции; $\{A^1, \dots, A^n\}$ – множество агентов, входящих в коалицию; G – цель коалиции; $\{St_1, \dots, St_l\}$ – множество допустимых стратегий поведения коалиции; KB – база знаний коалиции.

Выполнение плана заказов

$$PZ = \{PZ_1, \dots, PZ_m, \dots, PZ_l\}$$

формируется коалициями $\{K_1, \dots, K_m, \dots, K_q\}$ и их целями $\{G_1, \dots, G_m, \dots, G_q\}$ и состоит из определенной приоритетом последовательности действий $\{DK_1, \dots, DK_m, \dots, DK_p\}$.

План PZ_m – это структура

$$PZ_m = \langle \{DK_1, \dots, DK_m, \dots, DK_p\}, G_m, \{AD_1, \dots, AD_n\}, KB_m, \{ZK_1, \dots, ZK_m\} \rangle,$$

где $\{DK_1, \dots, DK_m, \dots, DK_p\}$ – действия плана; G_m – цель плана; $\{AD_1, \dots, AD_n\}$ – множество агентов, осуществляющих план; $\{ZK_1, \dots, ZK_m\}$ – ресурсы системы. Процесс получения деталей с помощью ТП основанных на операциях механообработки при помощи резания можно представить в виде следующих этапов:

1) формирование заявки на изготовление деталей в виде множества заказов $\{Z_1, \dots, Z_j\}$, упорядоченного в порядке приоритета их изготовления, где Z_j – количество заказанных деталей j-го вида;

2) выбор оптимальной заготовки для j-го вида детали;

3) поиск в БЗ базового ТП изготовления j-го вида изделий в виде набора операций

$$TP^j = O_1, O_2, \dots, O_{j_0}, j = \overline{1 \div j_0},$$

где j_0 – количество операций в базовом ТП для j-го вида изделия;

4) определение станка, который выполнит операцию с минимальным временем, с учетом всех технологических ограничений на качество обработанной поверхности, и с учетом времени транспортировки детали и инструмента;

5) составление и визуализация расписания станочного оборудования цеха.

На рис. 1 представлена структура МАС управления механообрабатывающего цеха. Работу МАС цеха (рис. 1) можно представить как взаимодействие множества агентов заказов

$$A_{ord}^i, i = 1, \dots, I,$$

где I – количество поступивших заказов. A_{ord}^i , которые инициируют создание агентов деталей $A_{dt}^j, j = 1, \dots, J$, где J – количество деталей j-вида.

A_{dt}^j посылают запросы к агентам заготовок

$$A_{wp}^n, n = 1, \dots, N_{wp},$$

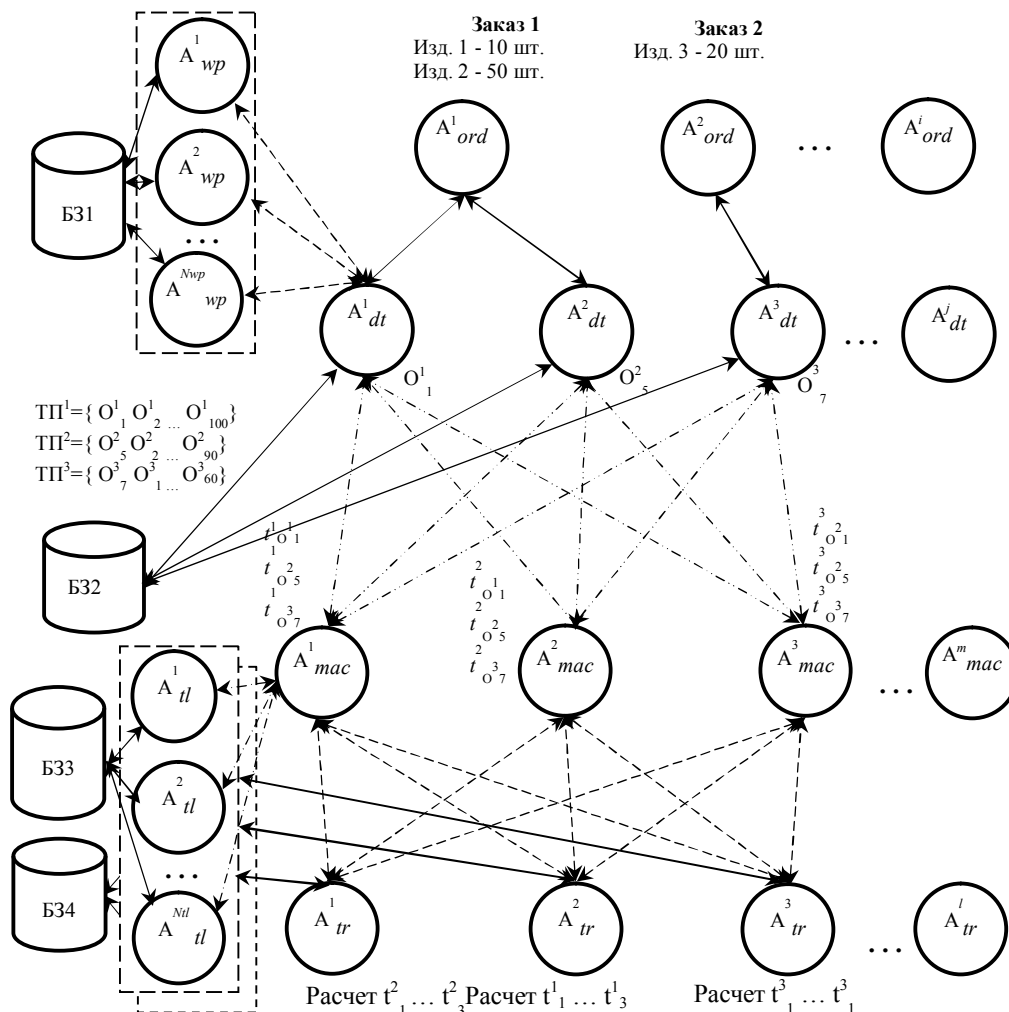


Рис. 1. Мультиагентная модель производственного цеха; БЗ1 – база знаний заготовок; БЗ2 – база знаний базового ТП; БЗ3 и БЗ4 базы знаний инструментов и приспособлений

где N_{wp} – количество видов заготовок, для определения оптимальных заготовок для деталей и, на основании данных БЗ ТП, определяют базовые ТП изготовления деталей.

Затем A_{dt}^j последовательно посылают запросы на выполнение операций из множества базового ТП к агентам обрабатывающего оборудования (станкам) A_{mac}^m , $m=1, \dots, M$, где M – число станков, участвующих в аукционе на выполнение одной операции ТП. Каждый A_{mac}^m анализирует запрос на операцию от A_{dt}^j и если станок может ее выполнить и он свободен (или освободится через некоторое время), то агенты A_{mac}^m определяют время выполнения операции на станке. Для определения времени доставки детали, инструмента и приспособлений A_{mac}^m посылают свои запросы на доставку к коалиции агентов транспортных роботов A_{tr}^r , $r=1, \dots, R$, где R – число роботов, участвующих в коалициях, и через аукцион по времени доставки определяют для каждого робота обслуживаемый станок, инструмент и приспособление. Каждое время доставки рассчитывается A_{tr}^r , который отвечает за управление роботом, при этом законы управления зависят от марки робота, его загруженности, скорости перемещения, наличия манипуляторов и т.д.

Полученные от всех A_{mac}^m коалиции данные о времени используются при проведении аукциона для оптимального распределения всех операций ТП для всех A_{dt}^j . При окончании ТП агент детали принимает решения о транспортировке детали на склад или др.

Целевая функция коалиции агентов заготовок, сформированная для изготовления партии детали j -го типа имеет вид

$$G_{wp} = \sum_{n \in N_{wp}} d_j^n f_j \Rightarrow \min, \quad 0 \leq d_j^n \leq Z_j,$$

где d_j^n – количество заготовок, предлагаемых A_{wp}^n агентом; f_j – минимальный показатель экономической эффективности j -й заготовки, определяемый как разность стоимостей изготовления партий j -х видов заготовок; N_{wp} – множество агентов заготовок, входящих в коалицию и предлагающих изготовление изделия из j -ой заготовки. Для поиска оптимальной заготовки применялся аукцион, реализующий жадный алгоритм (на рис. 1 аукцион обозначен $\leftarrow \rightarrow$).

Целевая функция коалиции агентов станков A_{mac}^m для выполнения операций по изготовлению

j -й детали, например, может быть представлена в виде суммарного времени на изготовление детали в виде

$$G_{mac} = \sum_{m \in M} t_{mj} \Rightarrow \min,$$

где t_{mj} – время выполнения операций осуществляемых m -м агентом оборудования с учетом времени доставки детали, инструмента и приспособлений; M – множество агентов станков, входящих в коалицию и предлагающих выполнение операции для j -й детали. Для поиска оптимальной загрузки станков планируется применение комбинаторного аукциона на основе аукциона PAUSE, который использует распределенный алгоритм решения задачи, выполняется в несколько этапов и находит квазиоптимальное решение (на рис. 1 аукцион обозначен $\leftarrow \rightarrow$). Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в следующих публикациях.

Решение транспортной задачи для коалиции транспортных роботов, свободных в данный момент времени и составляющих временную коалицию показано в [11] и реализуется через решение многокритериальной задачи оптимизации работы транспортных роботов путем формирования ситуационных коалиций роботов и проведения этими коалициями аукционов в режиме реального времени. На рис. 1 аукцион обозначен $\leftarrow \rightarrow$. Выбор оптимального инструмента для операции также производится на основе аукциона, (обозначено $\leftarrow \rightarrow$).

Компьютерная модель системы, для создания которой применялся редактор Protégé, язык Java и приложение Jade, показала гибкость, т.к. динамично реагирует на изменения, улучшает решения в реальном времени. Принимаемые решения характеризуются высокой скоростью реакции на события, небольшим временем нахождения решения задачи и представлены в [11].

Одним из важных этапов построения эффективной системы управления ТП является этап оптимизации режимов операций механообработки, на котором используя данные, полученные на этапе структурного синтеза ТП, определяются режимы работы выбранного оборудования обеспечивающие оптимальную его работу с позиции выбранного критерия (критериев) оптимальности [1]. Задача параметрической оптимизации процессов механообработки является многокритериальной многопараметрической задачей оптимизации (МЗО). Это обусловлено тем, что критериями оптимизации ТП механообработки зачастую являются различные достаточно противоречивые критерии, такие как производительность (Q), себестоимость (A), качество обработанной поверхности и т.д.

Для решения МЗО применяются различные подходы и методы: метод обобщенных критериев (аддитивный критерий, мультипликативный критерий);

методы «свертки» (метод последовательных уступок, метод главного критерия); специальные методы решения задач в многокритериальной постановке (лексикографический метод, поиск Парето-оптимального решения). Все методы решения МЗО, связанные с переходом от МЗО к однокритериальной задаче имеют схожие недостатки – сложность выбора «главного критерия», трудность в назначении весовых коэффициентов для различных критериев, наличие допущений или уступок, сложность при сравнении критериев, имеющих разные размерности, и т.п.

Для получения численных решений МЗО ТП применяются алгоритмы, в которых непосредственно используют концепцию доминирования по Парето, например, VEGA, FFGA, NPGA, SPEA [12].

Наибольшее влияние на изменение выходных параметров процесса механообработки имеет величина накапливаемого износа инструмента (h_z). Это связано с тем, что при одних и тех же входных операционных параметрах от износа зависит уровень сил резания, шероховатость обработанной поверхности, температура в зоне резания, размерная точность получаемой детали и т.д. [13, 14]. Новизной данного подхода является учет величины текущего накапливаемого износа инструмента, что позволяет получить физически более адекватную математическую модель процесса и, как следствие, физически более реальное оптимальное решение для МЗО.

В работе при постановке задач параметрической оптимизации процессов обработки резанием на примере операции чистового точения рассматриваются 4 целевые функции: себестоимость операции A , энергозатраты E_z , размерная точность Δ_Σ , производительность операции Q и 10 ограничений: по мощности электродвигателя привода главного движения станка N_{dv} ; по минимальной и максимальной скорости резания V ; по минимальной и максимальной скорости подачи S ; по прочности режущего инструмента (по максимальному напряжению $\sigma_{\max}$); по жесткости режущего инструмента (стреле прогиба f_i); по жесткости заготовки (стреле прогиба f_z); по прочности механизма продольной подачи станка (максимальной силе F_{xd}); по шероховатости обработанной поверхности R_a . Оптимальное решение определяется путем минимизации (максимизации) соответствующих целевых функций или их комбинации за счет поиска оптимального сочетания варьируемых параметров скорости подачи S и скорости резания V в пределах операции по обработке каждой последующей детали.

Рассматриваемые в работе целевые функции имеют вид [13, 15]:

$$A = \frac{l_z}{S} \left(a_{\text{rab}} + a_{\text{exp}} + \frac{e}{T_{\text{ef}}} + \frac{q_e F_z V}{6 \cdot 10^4 \eta_{\text{st}}} \right) \Rightarrow \min,$$

$$E_z = \frac{F_z V}{6 \cdot 10^4 \eta_{\text{st}}} \Rightarrow \min,$$

$$\Delta_\Sigma = \frac{F_y l_z^3}{k_z E_z I_z} \Rightarrow \min, Q = \frac{St}{l_z \Delta} \Rightarrow \max,$$

где l_z – длина заготовки, мм; a_{rab} – минутная заработная плата рабочего, грн/мин; a_{exp} – расходы на эксплуатацию станка, грн/мин; e – стоимость инструмента, грн; T_{ef} – время эффективной эксплуатации инструмента (эффективный период стойкости), мин; q_e – стоимость одного кВт/час электроэнергии, грн; F_z – тангенциальная сила резания, Н; η_{st} – КПД станка; F_y – радиальная сила резания, Н; k_z – коэффициент, зависящий от способа закрепления заготовки; E_z – модуль продольной упругости заготовки, МПа; I_z – момент инерции поперечного сечения заготовки, мм⁴; t – глубина резания, мм; Δ – припуск, мм.

Ограничения при решении МЗО представлены зависимостями из [13, 15]:

$$N_{dv} = \frac{F_z V}{60 \cdot 10^4 \eta_{\text{st}}} \leq N_{dp},$$

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, S_{\min} \leq S \leq S_{\max},$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F_z l_i k_{zp}}{W_i} \leq [\sigma_i],$$

$$f_i = \frac{F_z l_i^3}{3 E_i I_i} \leq f_{id},$$

$$f_z = \frac{F_y l_z^3}{k E_z I_z} \leq f_{zd},$$

$$F_x \leq F_{xd}, R_a(V, S, t, h_z) \leq R_{a \max},$$

где N_{dp} – предельная паспортная потребляемая мощность электродвигателя станка, кВт; $V_{\min}$ – минимальная допустимая скорость резания станка, м/мин; $V_{\max}$ – максимальная допустимая скорость резания станка, м/мин; $S_{\min}$ – минимальная допустимая скорость подачи станка, мм/мин; $S_{\max}$ – максимальная допустимая скорость подачи станка, мм/мин; k_{zp} – коэффициент запаса прочности; W_i – момент сопротивления сечения державки резца, мм³; $[\sigma_i]$ – допускаемое напряжение материала державки резца, МПа; l_i – длина державки резца, мм; E_i – модуль упругости материала державки, Н/мм²; I_i – момент инерции сечения державки резца, мм⁴; f_{id} – допустимая стрела прогиба державки резца, мм; f_{zd} – допустимая стрела прогиба заготовки, мм; F_x – осевая сила, Н; $R_{a \max}$ – максимально допускаемая шероховатость поверхности, мкм.

Следует отметить, что рабочие (выходные) параметры процесса обработки, такие, как время эф-

фективной эксплуатации инструмента T_{ef} , усилие резания F_z , F_y , шероховатость обрабатываемой поверхности R_a и др. зависят от варьируемых операционных параметров S и V и накопленного износа по задней поверхности режущего инструмента h_z . В свою очередь, приращение износа Δh_z за время обработки одной заготовки определяется уровнем ранее накопленного износа и операционными параметрами S и V . Отдельные функциональные зависимости для выходных параметров описываются аналитически, а в большинстве практических случаев используются экспериментально-аналитические или чисто экспериментальные зависимости [16 – 18].

Полученная математическая модель процесса точения имеет 41 входной параметр, 80 параметров процесса рассчитывается. Как ранее отмечалось, одной из проблем, возникающих при решении поставленной задачи, является то, что для некоторых параметров, входящих в математическую модель, вид функции, описывающий их с достаточной точностью, трудно формализуем, либо применяемые зависимости содержат эмпирические коэффициенты, получаемые в ходе обработки значительного количества экспериментов. Поэтому для получения ряда зависимостей в работе была применена НС персептрон с обратным распространением ошибки. При помощи НС были аппроксимированы данные из [16-18] для определения h_z и R_a . На рис. 2 и 3 показаны результаты аппроксимации при помощи НС экспериментальных данных из [16-18] для получения зависимостей

$$h_z = h_z(S, V, t);$$

$$R_a = R_a(S, V)$$

при фиксированной глубине резания.

Другие данные, необходимые для проведения расчетов, определялись либо на основе соответствующих аналитических зависимостей, либо из соответствующей справочной литературы или технической документации на оборудование и инструмент.

При аппроксимации данных с помощью НС удалось добиться максимальной погрешности 2-3 %.

В работе в качестве практического примера рассмотрен расчет оптимального режима обработки для тонкого точения ($\Delta = t$) с входными параметрами процесса:

- материал заготовки – сталь 52100;
- скорость резания станка $V = 1-400$ м/мин;
- скорость подачи станка $S = 0,1-0,24$ мм/оборот;
- глубина резания $t = 0,1$ мм;
- заготовки $l_z = 70$ мм,
- диаметр $D = 100$ мм;
- максимально допускаемая шероховатость поверхности $R_{amax} = 64$ мкм;
- минутная зарплата рабочего $a_{tab} = 0,83$ грн/мин;
- расходы на экспл. станка $a_{exp} = 8,5$ грн/мин;
- стоимость инструмента $e = 1250$ грн;
- стоимость кВт/час электроэнергии $q_e = 1,56$ грн;
- модуль продольной упругости заготовки $E_z = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент, зависящий от способа закрепления заготовки $k_z = 2$;
- модуль упругости материала $E_i = 2 \cdot 10^5$ МПа;

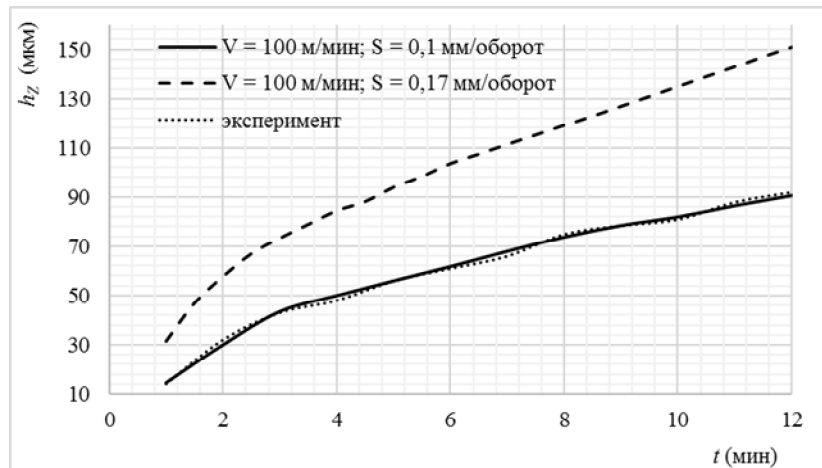


Рис. 2. График зависимости износа инструмента от времени при заданной S и V полученные при помощи НС

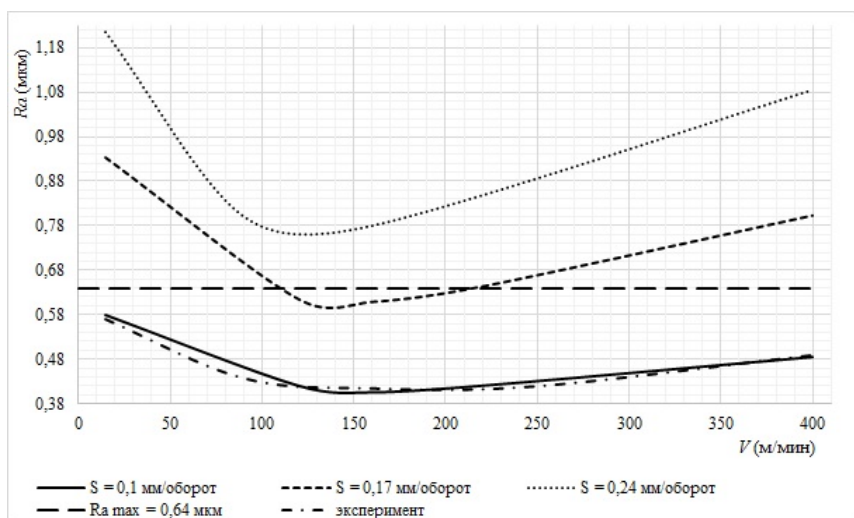


Рис. 3. График зависимости R_a обработанной поверхности от S и V полученный при помощи НС

інструмент – TP20 с радіусом носа 0,8 мм;
станок – PicoMax 60-M.

Технические данные для станка и инструмента взяты из соответствующей технической документации. Максимальное значение V ограничено значением 400 м/мин, т.к. при большей скорости температура, возникающая в зоне резания, вызывает необратимые изменения поверхностного слоя детали. Время эффективной эксплуатации инструмента T_{ef} определялось, как время работоспособности инструмента (по достижению предельного износа) или по достижению уровня максимальной допустимой себестоимости операции.

Для поиска Парето-оптимального решения при комбинации всех целевых функций был применен один из методов искусственного интеллекта – Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm (FFGA) [19].

МЗО решалась с учетом комбинации всех 4-х целевых функций при их равной значимости (вес каждой функции равен 1).

На рис. 4 показано решение МЗО для случая острого инструмента.

В табл. 1 приведено решение для случаев острого инструмента ($h_z = 0$ мм) и инструмента с значительным износом ($h_z = 0,2$ мм).

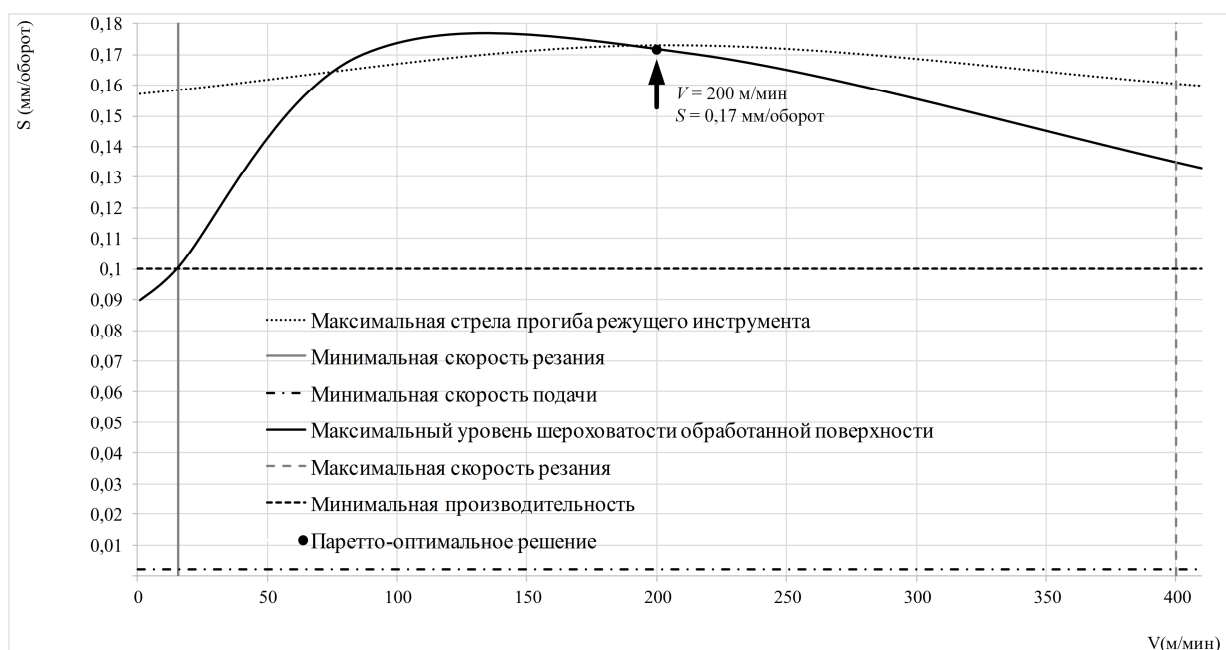


Рис. 4. Парето-оптимальное решение МЗО параметров операции чистового точения (для острого инструмента)

Таблица 1

Результаты расчетов (операция чистовое точение)

Параметры инструмента	Себестоимость операции A , грн	Энергозатраты E_z , кВт	Отклонение размерной точности Δ_{Σ} , мм	Производительность операции Q , мин ⁻¹	Скорость подачи станка S , мм/мин	Скорость резания станка V , м/мин
Острый инструмент $h_z=0$ мм	29,10	3,337	$2,178 \cdot 10^{-5}$	1,08	108,28	200
Инструмент с износом $h_z=0,2$ мм	103,07	3,820	$2,322 \cdot 10^{-5}$	0,8	80	250

Вывод

В работе для планирования оптимальной загрузки оборудования механообрабатывающего цеха предложена система поддержки принятия решений, основанная на мультиагентном подходе, учитывающая особенности ТП резания. Определены целевые функции коалиций, реализующих производственный план и целевые функции агентов. Определены методы решения задач поиска оптимальных решений на всех этапах изготовления партий изде-

лий. Поставлена и решена многокритериальная задача параметрической оптимизации для процессов обработки резанием с учетом величины текущего накапливаемого износа инструмента. В качестве целевой функции использована сумма четырех составляющих: себестоимость операции, энергозатраты, размерная точность, производительность операции при наличии 10 технических и технологических ограничений. Приведен пример определения оптимального режима обработки для операции чистового точения. В дальнейшем планируются работы по

моделированию работы интеллектуальных агентов в условиях появления нестандартных ситуаций. Система в условиях имитационной модели производства изделий обеспечивает минимальное время изготовления партий изделий.

Список литературы

1. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / А.В. Богуслав, Ал.А. Олейник и др. Под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. – Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2009. – 468 с.
2. Моделирование технологических процессов лезвийной обработки методами искусственного интеллекта: монография/ В.Д. Дмитриенко, И.П. Хавина и др. – Харьков: НТМТ, 2009. – 224 с.
3. Denkena B., Battino A., Woelk P.-O. Intelligent software agents as a basis for collaborative manufacturing systems. *Intelligent Production Machines and Systems, First I*PROMS Virtual Conference 4-15 July 2005*, – Elsevier – 2005. – p. 17-22.
4. M.S. Carrilero, F. Aguayo, J.R. Lama, J.E. Ares and M. Marcos, Integracion de modelos Bionicos, Holonicos y Fractales para Fabricacion Distribuida, XVI Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica, Leon (Spain), 2004.
5. Teti R. Agent-based multiple supplier tool management system. *Intelligent Production Machines and Systems, First I*PROMS Virtual Conference 4-15 July 2005*, – Elsevier – 2005. – p. 579-584.
6. P. Cramton, Y. Shoham, and R. Steinberg, editors. *Combinatorial Auctions*. MIT Press, 2006. – 1179 p.
7. Vorobeychik Y. A game theoretic bidding agent for the ad auction game // *Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, 2010, – pp. 6-12.
8. Vokrinek J., Pavlicek D., Šmerák R. Simulation of manufacturing processes using multi-agent technology. *Intelligent Production Machines and Systems, First I*PROMS Virtual Conference 4-15 July 2005*, – Elsevier – 2005. – p. 461-466.
9. Teti R. Agent-based multiple supplier tool management system. *Intelligent Production Machines and Systems, First I*PROMS Virtual Conference 4-15 July 2005*, – Elsevier – 2005. – p. 579-584.
10. Vrba, P. JAVA-Based Agent platforms evaluation, *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing, LNAI 2744, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2003, pp. 47-58.
11. Khavina I. Multiagent system for the optimal control of a combination of transport robots in an manufacturing technological process // *International Conference Telecommunications and Computer Science, TCSET'2016, 23-26 February, 2016, Slavske in Lviv region*, 5 p.
12. Eckart Zitzler. *Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results* / E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele // *Massachusetts Institute of Technology. Evolutionary Computation*. – 2000. – № 8(2). – P.p. 173–195.
13. Воронцов А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении / Воронцов А. Л., Албагачиев А. Ю., Султан-заде Н.М.; Старый Оскол : ТНТ, 2014. – 552 с.
14. Tugrul Ozel. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning / T. Ozel, Tsu-Kong Hsu, Erol Zeren // *International journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2005. – №25. – pp. 262-269.
15. Яцерицын П. И. Теория резания / Яцерицын П. И., Фельдштейн Е. Э., Корниевич М.А.; Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.
16. Fonseca C. M. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*. – 1998. – № 28. – P.p. 26–37.
17. Wenge Song. 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.
18. Paiva P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – №189. – 26-35 pp.
19. M. W. Azizi. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel / M. W. Azizi, S. Belhadi, M. A. Yallese // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2012. – Vol. 26, Issue 12. – p.p. 4105-4114.

Надійшла до редколегії 1.11.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ МЕХАНООБРОБНОГО ЦЕХУ

В.В. Лімаренко, І.П. Хавіна

В роботі для планування завантаження обладнання механообробного цеху запропонована система підтримки прийняття рішень, що заснована на мультіагентній системі, яка враховує особливості технологічного процесу лезової обробки, включаючи накопичений знос інструменту і в умовах імітаційної моделі виробництва забезпечує мінімальний час виготовлення партій виробів.

Ключові слова: планування завантаження обладнання, мультіагентна система, оптимізація параметрів технологічних процесів обробки різанням з урахуванням зносу інструменту, багатокритеріальна оптимізація, Парето-оптимальне рішення.

MULTI-AGENT SYSTEMS CONTROL THE OPERATION OF MACHINING SHOP

V.V. Lymarenko, I.P. Havin

In the planning for utilization of equipment machining workshop proposed decision support system based on multi-agent system that takes into account the process of processing blade, including lessons and tool wear in a simulation model of production ensures a minimum time of manufacturing of products batches.

Keywords: plan loading equipment, multi-agent system, the optimization of process parameters based machining tool wear, multi-objective optimization, Pareto-optimal solution.