



допомогою МНК отримаємо такі їх значення: $n = 1.3$ та $\Theta = 34,04$ хв. Значення перехідної характеристики x^p , розраховані за рівнянням (10) для знайдених n та Θ , наведені у таблиці. Значення функції нев'язки у цьому випадку суттєво зменшилися і склали $\Phi_B(a^*) = 95,05$ °C²хв.

Висновок. Розроблена модель з нестационарною сталою часу для опису динаміки періодичного процесу, що забезпечує зменшення кількості ідентифікованих параметрів та використання для їх визначення більш економічних без пошукових методів без погіршення точності моделі.

Список використаних джерел

- [1] Цирлин А.М. Вариационные методы оптимизации управляемых объектов / А.М. Цирлин, В.С.Балакирев, Е.Г.Дудников. – М.: Энергия, 1976. – 448с.
- [2] Трегуб В.Г. Керування об'єктами періодичної дії / В.Г. Трегуб, О.М. Клименко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. - №2. – С.85-89.
- [3] Балакирев В.С. Методы расчета на ЭЦВМ коэффициентов теплообмена аппаратов периодического действия / В.С. Балакирев, Е.Б. Манусов // Инженерно-технический журнал. – 1969. – №3. – С.472-479.

References

- [1] A. M. Cirilin, V. S. Balakirev and E. G. Dudnikov, Variacionnye metody optimizacii upravlyaemyh ob"ektov. Moskva: Energiya, 1976.
- [2] V. G. Tregub and O. M. Klimenko, "Keruvannya ob"ektami periodicnoi dii," Naukovi visti NTUU KPI, no. 2, pp. 85-89, 2013.
- [3] V. S. Balakirev and E. B. Manusov "Metody rascheta na ECVM koehfficientov teploobmena apparatov periodicheskogo dejstviya," Inzhenerno-tehnicheskij zhurnal, no. 3, pp. 472-479, 1969.

УДК 681.51

ПРЕЦИЗИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ИНСТРУМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ИОННО- ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКОЙ

Тонконогий В. М.¹, Киркопуло Е. Г.²

ORCID: ¹0000-0003-1459-9870, ²0000-0001-5570-5989

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation technologies and business - processes.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Аннотация. Показана актуальность разработки точных систем управления процессом ионно-плазменной очистки инструмента. Важным критерием качества программного управления при очистке является поддержание температуры очищаемого инструмента в соответствии с заданной временной программой при недопустимости перегрева в радиальном направлении. Максимальное допускаемое отклонение температуры от заданной линейной программы нагрева составляет ± 25 К. В статье исследуется проблема распределения температурного поля при нагреве металлорежущего инструмента цилиндрической формы для ранее разработанной системы автоматического управления температурным режимом ионно-плазменной установки Булат. В установке нагрев инструмента производится как за счет потоков тепла ионной бомбардировки, так и от нагретой подложки, а потери тепла происходят в результате излучения. Тепловой поток излучения определяется законом Стефана-Больцмана. Теплопередача от нагретой подложки к инструменту определяется законом Фурье. Для анализа качества работы системы управления было проведено прецизионное моделирование технологического процесса с



использованием математического аппарата дифференциальных уравнений в частных производных. В процессе решения классического уравнения теплопроводности инструмента используются функции Бесселя 1-го рода 0-го и 1-го порядков. Особенностью моделирования является замена граничных условий импульсным управлением в соответствии с теорией синтеза распределенных систем управления. Анализ показал, что разработанная система управления практически одинаково поддерживает температуру по всему радиусу стержня, что показывает высокое качество её функционирования.

Abstract. The relevance of the development of precise control systems for the process of ion-plasma cleaning is shown. The main problem in this process is to maintain the temperature in accordance with the time limit at each time point. The quality criterion of the process is to maintain the maximum deviation of temperature from a given linear heating program in ± 25 K diapason. The article investigates the problem of temperature distribution of heating cylindrical cutting tools for the previously developed automatic control system for the temperature regime of the Bulat ion-plasma unit. In the process, the tool is heated by the heat of the ion bombardment and from the heated substrate, and the heat loss comes from radiation. The heat flux of radiation is determined by the Stefan-Boltzmann law. The heat transfer from the heated substrate to the instrument is determined by the Fourier law. To analyze the quality of the control system, precision modeling of the technological process was carried out using the mathematical apparatus of partial differential equations. In the process of solving the classical heat equation for a tool, Bessel functions of the 1st kind of the 0th and 1st orders are used. A specific feature of modeling is the replacement of boundary conditions by impulse control according to the theory of the distributed control systems design. Analysis showed that the developed control system maintains the temperature almost the same over the entire radius of the rod, which shows the high quality of its functioning.

Ключевые слова: нанесение покрытий, ионно-плазменная очистка, система управления, металлорежущий инструмент, прецизионное моделирование, распределенная система

Keywords: coating, Arc-PVD, control system, metal cutting tools, precision modeling, distributed system

Введение. Постоянное увеличение номенклатуры и требований к качеству металлорежущего инструмента ставит новые, более жесткие требования к качеству работы систем автоматического управления в установках нанесения современных защитных покрытий на инструмент. Универсальной и одной из распространенных установок для обработки металлорежущего инструмента является установка типа Булат, которая реализует разработанный в Украине метод КИБ (катодно-ионная бомбардировка, т.е. метод конденсации вещества в вакууме из плазменной фазы с ионной бомбардировкой). Общая постановка задачи автоматизации указанной установки рассмотрена в работе [1]. Задача разработки новых систем автоматического управления для всех этапов работы установки Булат рассмотрена в работе [2]. Проблема реализации компьютерной системы управления на базе предложенного решения рассмотрена в работе [3]. В силу сравнительно высокой сложности технологического процесса подробный анализ качества работы его систем управления требует применения прецизионных методов моделирования с использованием теории распределенных систем управления [4,5,6].

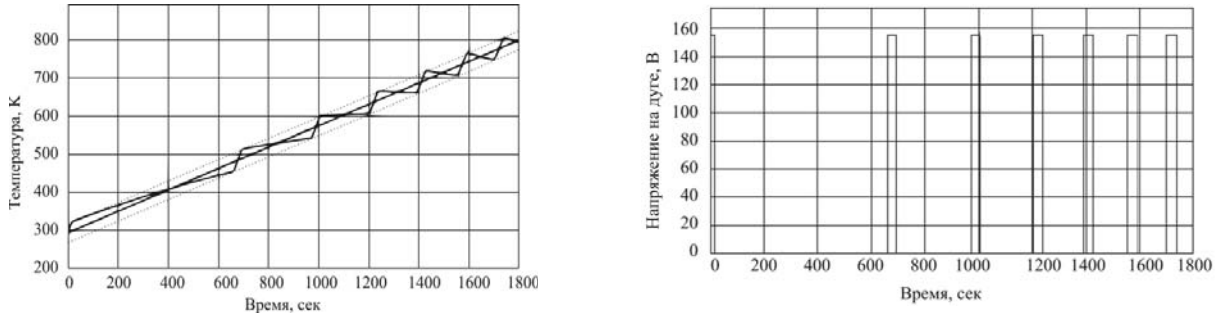
Целью статьи является анализ качества функционирования системы программного управления ионной очисткой металлорежущего инструмента в технологическом процессе нанесения защитного покрытия. Качество функционирования зависит от радиального распределения температурного поля при нагреве в процессе работы системы автоматического управления на наиболее ответственном этапе технологического процесса – ионной очистке.

Анализ последних исследований и публикаций. Имеется немало публикаций, в которых рассматривается задача распределения температурного поля в инструменте. Однако, чаще всего эта задача рассматривается либо в статике, либо рассматривается процесс распределения температуры вдоль инструмента [9, 10, 11]. Задача радиального распределения тепла в цилиндрических координатах рассматривается реже. Хотя, в общем, такая задача решена в фундаментальных трудах [5, 8, 12, 13], работ, посвященных управляемому радиальному распределению температурного поля при ионной очистке найдено не было. Проблема здесь заключается в том, что управление входит в граничные условия двухточечной краевой задачи для дифференциальных уравнений частных производных, которая в общем виде считается трудно разрешимой. Однако, в работах Бутковского [5, 8] предложен общий принцип решения, основанный на замене краевых условий управлением, включенным через дельта-функцию в правую часть дифференциального уравнения в частных производных. Именно этот подход применен в статье для решения задачи радиального нестационарного распределения температур в металлическом инструменте (обрабатываемом инструменте) и прецизионного моделировании такого распределения с целью подтверждения качества функционирования разработанной нами ранее системы управления, основанной на использовании упрощенной модели, учитывающей температуру на поверхности инструмента и не учитывающей радиального распределения температурного поля.

Система управления процессом ионной очистки. Рассмотрим задачу управления процессом ионной очистки стального инструмента – резца 12Х18Н10Т. Процесс состоит из следующих этапов: ручная загрузка заготовок, установка вакуума (0.3 Па), включение механизма вращения в 8 об/мин, повышение температуры по установленной линейной программе за 30 мин от 300К до 800 К, отключение напряжения. Регулирование температуры технически может быть реализовано только с помощью релейного регулятора, который включает или отключает напряжение



дуги, создающей определенную плотность теплового потока на инструмент. Отклонение температуры от заданной программы при таком регулировании будет всегда, однако чем оно меньше, тем больше прочность полученного инструмента [7]. Переходные процесс программной системы управления ионной очисткой показаны на рис.1.



а) управляемая переменная

б) управляющее воздействие

Рис. 1 – Переходные процессы программной системы управления ионной очистки

Как видно, управляемая переменная (температура) не вышла за границы технологического регламента $\pm 25\text{K}$. А изменение управляющего воздействия в течение процесса происходило 16 раз.

Построение математической модели технологического процесса. Рассмотрим задачу управления процессом нагрева цилиндрической заготовки как системы с распределенными параметрами, при допуске постоянного давления в камере установки.

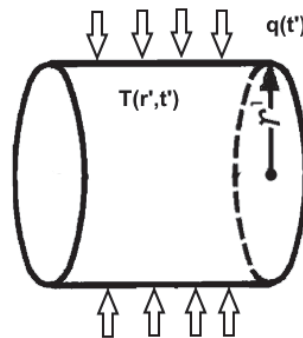
Считаем, что нагрев боковой поверхности происходит равномерно и управляющее воздействие – удельный поток тепла на поверхности – является функцией только времени. Потерями через торцевые поверхности пренебрежем. Тогда процесс описывается классическим одномерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах [5]. Схема процесса показана на рис. 2.

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t'} = \frac{k}{r'} \cdot \frac{\partial}{\partial r'} \cdot \left(r' \cdot \frac{\partial T}{\partial r'} \right) \quad (1)$$

$$0 \leq r' \leq R, \quad t' > 0,$$

с граничными условиями

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r'} \right|_{r'=0} = 0, \quad k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r'} \right|_{r'=R} = -q(t').$$

**Рис. 2 – Схема для формирования уравнения теплопроводности**

Необходимо получить заданное распределение $T(r', t')$, изменяя $q(t')$.

Введем безразмерные переменные:

$$x = T/T_0, \quad t = t' \cdot k / (\rho \cdot C_p \cdot R^2), \quad r = r' / R, \quad u(t) = q(t') \cdot R / (T_0 \cdot k),$$

где ρ – плотность стали, $\text{кг}/\text{м}^3$;

C_p – удельная теплоемкость стали, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

k – теплопроводность материала стали, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;



T_0 – начальное распределение температуры $T(R,0)$ на поверхности цилиндра, К.

Нагрев инструмента происходит за счет потоков тепла ионной бомбардировки q_{arc} и от нагретой подложки q_{sub} , а потери тепла происходят излучением q_{rad} . Тогда суммарный тепловой поток $q(\tau)$ определится по соотношению:

$$q(\tau) = q_{arc}(\tau) - q_{rad}(\tau) + q_{sub}(\tau). \quad (2)$$

Тепловой поток q_{arc} определяется [14] из выражения:

$$q_{arc}(\tau) = j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right), \quad (3)$$

где j – плотность ионного тока, А/м²;
 s – площадь поверхности объекта, м²;
 E_0 – средняя кинетическая энергия ионов, эВ;
 \bar{z} – средняя кратность заряда иона;
 e – заряд электрона, эВ;
 U_{II} – напряжение подложки, В.

Тепловой поток излучения определяется законом Стефана-Больцмана:

$$q_{rad}(\tau) = s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau), \quad (4)$$

где ε – степень черноты поверхности излучения;
 σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Теплопередача от нагретой подложки к инструменту определяется законом Фурье:

$$q_{sub}(\tau) = \alpha \cdot (T_{sub} - T(\tau)), \quad (5)$$

где α – экспериментальный коэффициент для стали;
 T_{II} – постоянная температура подложки К.

Тогда общий тепловой поток равен:

$$q(\tau) = j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right) - s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \alpha \cdot (T_{sub} - T). \quad (6)$$

Пересчитываемое управление (тепловой поток), подаваемое на объект будет равно:

$$u(t) = \frac{\left(j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right) - s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \alpha \cdot (T_{sub} - T) \right) \cdot R}{T_0 \cdot k}, \quad (7)$$

где R – радиус заготовки, м;
 L – длина заготовки, м.

Рассматриваемая система в безразмерных переменных система имеет вид

$$\frac{\partial x(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial x(r,t)}{\partial r} \right), \quad 0 \leq r \leq 1, \quad t > 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=1} = u(t), \quad x(0,r) = x_0(r).$$

Теперь включим управление $u(t)$ в правую часть системы, изменив граничные условия с помощью δ -функций, следуя [5-7]:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial x(r,t)}{\partial r} \right) + \delta(r-1) \cdot u(t), \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=1^+} = 0, \quad x(0,r) = x_0(r).$$

Решим полученную систему методом разделения переменных. Для этого представим решение в форме:

$$x(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) \cdot \varphi_n(r), \quad (10)$$



$$\delta(r-1) \cdot u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n(t) \cdot \varphi_n(r).$$

Подставив приведенные ряды в систему, запишем:

$$\varphi(r) \cdot \frac{da_n(t)}{dt} = \frac{a_n(t)}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{d\varphi_n}{dr} \right) + b_n \cdot \varphi_n(r), \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} \right|_{r=1} = 0.$$

Видно, что исходная задача сводится к двум задачам на собственные значения, а именно:

$$\frac{da_n}{dt} = -\lambda_n \cdot a_n + b_n, \quad (12)$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{d\varphi_n}{dr} \right) + \lambda_n \cdot \varphi_n = 0.$$

Второе уравнение принадлежит к уравнениям типа Штурма – Лиувилля [15]. Следовательно, его собственные функции $\varphi_n(z)$ будут ортогональны с весом r :

$$\int_0^1 r \cdot \varphi_n(r) \cdot \varphi_m(r) \cdot dr = 0, \quad n \neq m,$$

откуда можно сделать вывод, что $\varphi_n^* = r \cdot \varphi_n(r)$ – собственные функции сопряженного оператора

$$\frac{d^2 \varphi_n^*}{dr^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{d\varphi_n^*}{dr} + \left(\frac{1}{r^2} + \lambda_n \right) \cdot \varphi_n^* = 0. \quad (13)$$

При этом известно, что

$$\int_0^1 \varphi_n^*(r) \cdot \varphi_m(r) \cdot dr = 0, \quad n \neq m. \quad (14)$$

Упрощает задачу то, что уравнение (13) можно преобразовать к уравнению Бесселя

$$r^2 \cdot \frac{d^2 \varphi_n}{dr^2} + r \cdot \frac{d\varphi_n}{dr} + r^2 \cdot \lambda_n \cdot \varphi_n = 0. \quad (15)$$

Решение уравнения Бесселя определяется через функции Бесселя

$$\varphi_n(r) = A_n \cdot J_0(\sqrt{\lambda_n} \cdot r) + B_n \cdot Y_0(\sqrt{\lambda_n} \cdot r), \quad (16)$$

где $J_n(x)$, $Y_n(x)$ – функции Бесселя первого и второго рода n -го порядка.

Первое граничное условие при $r=0$ дает

$$\frac{d\varphi_n}{dr} = -A_n \cdot \sqrt{\lambda_n} \cdot J_1(0) - B_n \cdot \sqrt{\lambda_n} \cdot Y_1(0) = 0. \quad (17)$$

Поскольку $J_1(0)=0$, $Y_1(0) \neq 0$ то очевидно, что $B_n=0$. Второе граничное условие при $r=1$ дает

$$\frac{d\varphi_n}{dr} = -A_n \cdot \sqrt{\lambda_n} \cdot J_1(\sqrt{\lambda_n}) = 0. \quad (18)$$

Отсюда

$$J_1(\sqrt{\lambda_n}) = 0. \quad (19)$$

Выберем функции A_n , соответствующие условию ортогональности собственных функций, в виде

$$A_n = \left(0.5 \cdot J_0^2(\sqrt{\lambda_n}) \right)^{-1/2} = \sqrt{2} / J_0(\sqrt{\lambda_n}). \quad (20)$$



Окончательно, собственные функции равны

$$\varphi_n(r) = J_0(r \cdot \sqrt{\lambda_n}) / J_0(\sqrt{\lambda_n}). \quad (21)$$

Функции b_n равны

$$b_n = \int_0^1 \delta(r-1) \cdot \varphi_n(r) \cdot u(t) \cdot dr = \varphi_n(1) \cdot u(t) = \sqrt{2} \cdot u(t). \quad (22)$$

Тогда

$$\frac{da_n}{dt} = -\lambda_n \cdot a_n + \sqrt{2} \cdot u(t). \quad (23)$$

$$a_n(0) = \int_0^1 r \cdot \varphi_n(r) \cdot x_0(r) \cdot dr.$$

Безразмерное распределение температуры определяется следующей формулой

$$x(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) \cdot \varphi_n(r), \quad (24)$$

где $\varphi_n(r) = \sqrt{2} \cdot J_0(r \cdot \sqrt{\lambda_n}) / J_0(\sqrt{\lambda_n})$, $n = 0, 1, 2, \dots$

Моделирование динамики технологического процесса. Моделирование проводится с целью определения точного радиального распределения температур при управлении, полученном при упрощенном моделировании (см. рис.16). Предполагается, что переходной процесс температуры во времени и радиальное распределение температур будут удовлетворять техническому регламенту.

Алгоритм моделирования нагрева цилиндрического инструмента включает следующие шаги

1) Необходимые переменные и их значения сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Переменные для моделирования динамики

Обозначение	Описание	Значение
ρ	плотность стали	8000 кг/м ³
C_p	удельная теплоемкость стали	505 Дж/(кг·К)
K	теплопроводность материала стали	47 Вт/(м·К)
T_0	начальное распределение температуры T(R,0) на поверхности цилиндра	300 К
J	плотность ионного тока	10 А/м ²
S	площадь поверхности объекта	6.283·10 ⁻³ м ²
E_0	средняя кинетическая энергия ионов	65 эВ
\bar{z}	средняя кратность заряда иона	1.79
e	заряд электрона	1 эВ
$U_{\text{п}}$	напряжение подложки	400 В
E	степень черноты поверхности излучения	0.15
σ_0	коэффициент излучения абсолютно черного тела	0.576·10 ⁻⁷ Вт/м ² К ⁴
α	экспериментальный коэффициент для стали	7.9 Вт/К
$T_{\text{п}}$	постоянная температура подложки	800 К
R	радиус цилиндра	0.01 м
L	длина цилиндра	0.1 м

2) Пересчитаем управление в безразмерную форму по уравнению (7)



$$u(t) = \frac{\left(j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{z \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right) - s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \alpha \cdot (T_{sub} - T) \right) \cdot R}{T_0 \cdot k} =$$

$$\frac{\left(10 \cdot 6.283 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{65}{1.79 \cdot 1} + 400 \right) - 6.283 \cdot 10^{-3} \cdot 0.15 \cdot 0.576 \cdot 10^{-7} \cdot (300 + 0.278 \cdot \tau)^4 + 7.9 \cdot (500 - 0.278 \cdot \tau) \right) \cdot 0.01}{300 \cdot 47} =$$

$$\frac{27.41 - 5.790 \cdot 10^{-11} \cdot (300 + 0.278 \cdot \tau)^4 + 7.9 \cdot (500 - 0.278 \cdot \tau)}{1.41 \cdot 10^6}$$

3) Зададимся множеством радиусов

$$r \in [0 \ 0.065 \ 0.13 \ 0.195 \ 0.26 \ 0.325 \ 0.39 \ 0.455 \ 0.52 \ 0.585 \ 0.65 \ 0.715 \ 0.78 \ 0.845 \ 0.91 \ 0.975].$$

4) Для моделирования достаточно 16 точек по времени. Тогда рассчитаем корни уравнения (19), откуда собственные значения, равны:

$$\lambda_0 = 0, \sqrt{\lambda_1} \approx 3.83, \sqrt{\lambda_2} \approx 7.01, \sqrt{\lambda_3} \approx 10.17, \sqrt{\lambda_4} \approx 13.32, \sqrt{\lambda_5} \approx 16.47, \sqrt{\lambda_6} \approx 19.62, \sqrt{\lambda_7} \approx 22.76,$$

$$\sqrt{\lambda_8} \approx 25.9, \sqrt{\lambda_9} \approx 29.05, \sqrt{\lambda_{10}} \approx 32.19, \sqrt{\lambda_{11}} \approx 35.33, \sqrt{\lambda_{12}} \approx 38.47, \sqrt{\lambda_{13}} \approx 41.62, \sqrt{\lambda_{14}} \approx 44.76, \sqrt{\lambda_{15}} \approx 47.9,$$

$$\sqrt{\lambda_{16}} \approx 51.04.$$

5) Рассчитаем для указанных радиусов собственные функции (16)

$$\phi_1 \approx 1.41, \phi_2 \approx -3.46, \phi_3 \approx 3.78, \phi_4 \approx -1.32, \phi_5 \approx -2.43, \phi_6 \approx 0.41, \phi_7 \approx 1.91, \phi_8 \approx 2.078, \phi_9 \approx 1.95, \phi_{10} \approx 1.63,$$

$$\phi_{11} \approx 0.5, \phi_{12} \approx -1.32, \phi_{13} \approx -0.94, \phi_{14} \approx 1.51, \phi_{15} \approx -0.92, \phi_{16} \approx 0.51$$

6) Зададимся множеством временных точек

$$t \in [0:10:1800] \text{ и разделим значение температур на } T_0$$

Проведем численное дифференцирование уравнения (23) по методу Рунге-Кутты 4 и 5 порядков и интерполируем полученные значения в точки диапазона t.

7) Определим значение $x(r,t)$ по формуле (24)

8) Приведем полученные значения x к натуральным, умножив их на T_0

Графические результаты моделирования показаны на рис. 3.

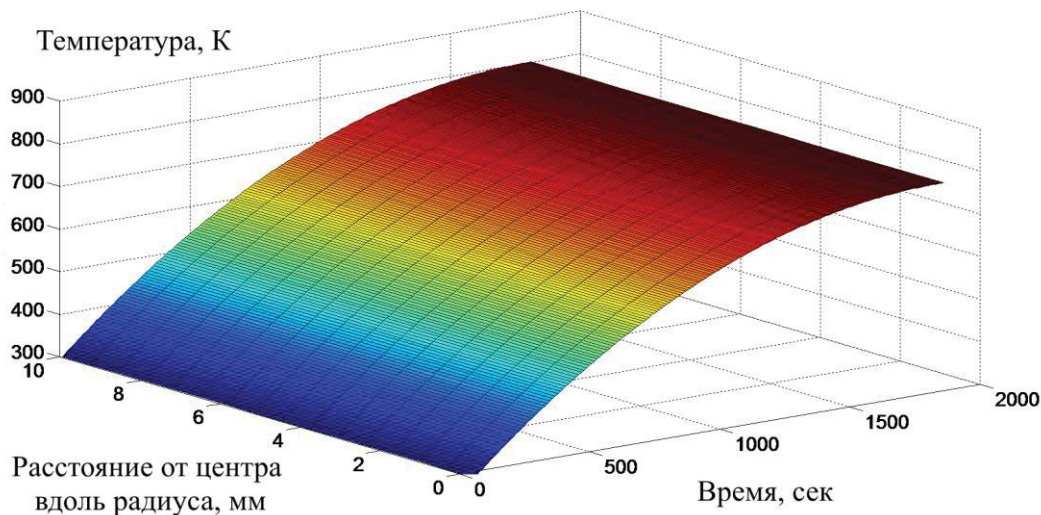


Рис. 3 – Графическое представление результатов моделирования динамики нагревания инструмента в различных участках по радиальному распределению

Результаты моделирования показывают, что температура во всех выделенных участках радиального распределения изменяется во времени практически одинаково, что означает, что разработанная система управления гарантирует высокое качество полученного инструмента. Отклонение температур по радиусу не превышает 1К. Переходной процесс нагрева инструмента во времени близок к полученному при упрощенном моделировании, проведенном в



работе [2], что подтверждает высокое качество системы управления, построенной с применением упрощенного моделирования.

Выводы. Разработка точных систем управления процессом ионной очистки металлорежущих инструментов является актуальным направлением исследования и позволяет повысить качество готовой продукции. На этапе ионного очищения основным параметром регулирования является температура, которая в установках метода КИБ (например, Булат) может регулироваться только релейным способом. С помощью имитационного моделирования возможно выбрать оптимальный временной режим повышения температуры в процессе бомбардировки и разработать точную систему управления, которая позволяет минимизировать отклонение температуры, что сказывается на прочности инструмента. Такая система для установки Булат была разработана в работе [2]. А в данной работе было проведено прецизионное моделирование процесса ионного очищения с использованием математического аппарата дифференциальных уравнений в частных производных с целью проверки распределения температурного поля в инструменте, что существенно влияет на качество работы этого инструмента. Результаты прецизионного моделирования показали высокое качество регулирования системы управления, поскольку температура по инструменту распределяется практически равномерно. Результаты работы могут быть использованы для проверки качества систем управления процессом ионного очищения металлорежущих инструментов разной конфигурации, изготовленных из разных материалов.

Литература

- [1] Киркопуло К.Г. Разработка системы автоматизации ионно-плазменной установки // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали XVIII міжнар. наук.-техн.конференції, 8-13 червня 2018 р. Одеса, 2018. С.110–113.*
- [2] Kirkopulo K., Tonkonogyi V., Stopakevych O., Stopakevych A. Design of a set of nonlinear control systems of the arc PVD ion plasma installation//*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. No 2 (92). P. 65–74.
- [3] Киркопуло Е. Разработка интерфейса оператора компьютерной системы автоматизации установки ионно-плазменного напыления//*Автоматизация технологических и бизнес-процессов.* 2018. №4(10). С. 54-61.
- [4] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Проблемы и методы теории и техники оптимального управления системами с распределенными параметрами. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/ipuss_conf/15/2_01.pdf (дата звернення: 10.5.2019).
- [5] Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. Москва : Наука, 1975.
- [6] Stopakevych O., Ulitska O. Design of precise control systems of industrial plants// *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. № 2(2). P. 56-62.
- [7] Тонконогий В.М., Оборский Г.А. Работоспособность и надежность инструментов с износостойкими покрытиями // *Труды Одесского политехнического университета.* 1997. No 1 (7) С. 130–133.
- [8] Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. М. Наука, 1979.
- [9] Бутусов И.Ю., Кумаков А., Худиковский В.Л., Перин Ю.Н. Расчет распределения температуры вдоль стержня при нестационарном теплообмене методом локальных тепловых потоков// *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура.* 2012. № 1 (25). С. 50-57.
- [10] Кудайкулов А. К., Кенжегулов Б.З., Утебаев У.Б., Токкулиев Б.М. Численное моделирование термо-напряженного состояния стержня в виде усеченного конуса// *Проблемы информатики.* 2015. №4. С. 14-21.
- [11] Видин Ю.В., Иванов Д.И., Казаков Р.В. Распределение температуры в стержне с двусторонним подводом тепла// *Известия томского технического университета.* 2012. №4(321). С. 5-6.
- [12] Тонконогий В.М. Автоматизация технологического процесса нанесения ионно-плазменных износостойких покрытий на режущий инструмент: дис. докт. техн. наук: 05.13.07. Одесса, 2004.
- [13] Стопакевич А. Системный анализ и теория сложных систем управления, Одесса: Астропринт, 2013.
- [14] Лунев В. И., Самойлов В. П. Баланс энергий и тепловые эффекты при металлизации сверхтвердых материалов конденсацией плазмы // *Сверхтвердые материалы.* 1980. № 2. С. 7–12.
- [15] Левитан Б. М., Саргсян И. С. Операторы Штурма — Лиувилля и Дирака. Москва: Наука, 1988.

References

- [1] K. Kirkopulo, "Razrobotka systemy avtomatyzacyyu yonno-plazmennoj ustanovky", in *Vymirjuvaljna ta obchysljuvaljna tekhnika v tekhnologichnykh procesakh: Materialy XVIII mizhnar. nauk.-tekhn. konferenciji*, Odessa, 2018, pp. 110-113
- [2] K. Kirkopulo, V. Tonkonogyi, O. Stopakevych, A. Stopakevych. "Design of a set of nonlinear control systems of the arc PVD ion plasma installation", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 92, no. 2, pp. 65-74, 2018.



- [3] K. Kirkopulo. "Razrabotka interfejsa operatora komp'yuternoj sistemy avtomatizacii ustanovki ionno-plazmennogo napylenija": *Avtomatizacija tehnologicheskikh i biznes-processov*, vol. 10, no. 4, pp.54-61, 2018.
- [4] J. Rapoport, Ju. Pleshivceva. Problemy i metody teorii i tehniki optimal'nogo upravlenija sistemami s raspredelennymi parametrami. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/ipuss_conf/15/2_01.pdf (last visited: 10.5.2019).
- [5] A. Butkovskij. *Metody upravlenija sistemami s raspredelennymi parametrami*. Moscow: Nauka, 1975.
- [6] O. Stopakevych, O. Ulitska. "Design of precise control systems of industrial plants", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 2, pp.56-62, 2017.
- [7] V. Tonkonogij, G. Oborskij, "Rabotosposobnost' i nadezhnost' instrumentov s iznosostojkimi pokrytijami", *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*, vol.7, no.1, pp.130-133, 1997.
- [8] A. Butkovskij. *Harakteristiki sistem s raspredelennymi parametrami*. Moscow: Nauka, 1979.
- [9] I. Butusov, A. Kumakov, V. Hudikovskiy, Ju. Perin. "Raschet raspredelenija temperatury vdol' sterzhnja pri nestacionarnom teploobmene metodom lokal'nyh teplovyh potokov", *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, vol. 25, no. 1, pp. 50-57, 2012.
- [10] A. Kudajkulov, B. Kenzhegulov, U. Utebaev, V. Tokkuliev. "Chislennoe modelirovanie termo-naprjazhennogo sostojanija sterzhnja v vide usechnogo konusa". *Problemy informatiki*, no. 4, pp. 14-21, 2015.
- [11] Ju. Vidin, D. Ivanov, R. Kazakov. "Raspredelenie temperatury v sterzhne s dvustoronnim podvodom tepla". *Izvestija tomского tehnicheskogo universiteta*, vol. 321, no. 4, pp. 5-6, 2012.
- [12] V. Tonkonogij. "Avtomatizacija tehnologicheskogo processa nanesenija ionno-plazmennyyh iznosostojkikh pokrytij na rezhushhij instrument." D.Science. thesis, ONPU, Odessa, 2004.
- [13] A. Stopakevych, *Systemnyi analiz y teoriya slozhnykh sistem upravleniya*, Odessa: Astroprint, 2013.
- [14] V. Lunev, V. Samoylov. "Balans jenergij i teplovyje jeffekty pri metallizacii sverhtverdyh materialov kondensaciej plazmy". *Sverhtverdyje materialy*, no. 2, pp. 7-12, 1980.
- [15] B. Levytan, I. Sargsyan. *Operatory Shturma — Liuvillja i Diraka*. Moscow: Nauka, 1988.

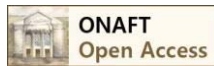
УДК 681.586.5

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Сандлер А.К.¹, Карпилов А.Ю.²

^{1,2}Национальный университет "Одесская морская академия", г. Одесса, Украина
E-mail: ¹albertsand4@gmail.com, ²kau.onma@gmail.com

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation technologies and business - processes."
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Аннотация: Нарушение режимов смазки неизбежно инициирует зарождение прогрессирующих с высокой скоростью дефектов в элементах подшипниковых узлов. Несвоевременное обнаружение деструктивных процессов в подшипниках роторов газотурбинных установок приводит к полному выходу установки из строя и может иметь катастрофические последствия, как для судна, так и группы судов в сложных навигационных условиях. К сожалению, существующие типы акселерометров в условиях концентрированного воздействия мощных электромагнитных, термических и вибрационных полей, компактно расположенного судового оборудования, не обеспечивают эффективный контроль вибрации подшипников в наиболее информативном высокочастотном